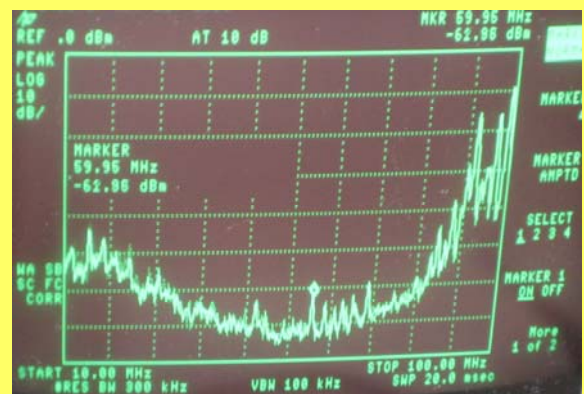


Francisco Javier Arcega Solsona, Ana María López Torres,
Carlos Tomás Medrano Sánchez, Inmaculada Plaza García,
Tomás Pollán Santamaría (en memoria)

Casos prácticos de Compatibilidad Electromagnética



Coordinador: Carlos Tomás Medrano Sánchez

Página en blanco

Francisco Javier Arcega Solsona, Ana María López Torres,
Carlos Tomás Medrano Sánchez, Inmaculada Plaza García,
Tomás Pollán Santamaría (en memoria)

Casos prácticos de Compatibilidad Electromagnética

Coordinador: Carlos Tomás Medrano Sánchez

Coordinador y editor: Carlos Tomás Medrano Sánchez

Depósito Legal: TE-3-2012

La presente obra está dividida en capítulos. El copyright de cada capítulo pertenece a su autor.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons, cuyo texto puede encontrarse en la dirección <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/>.

Historia del documento

Versión 1. Febrero de 2010. Primera lista de casos.

Versión 2. Febrero de 2011. Corrección de erratas menores.

Versión 3. Enero de 2012. Cambios en algunos títulos y paginación. Añadidos los resúmenes de dos casos de Tomás Pollán.

Página en blanco

En memoria de Tomás Pollán

Página en blanco

Introducción del coordinador

La existencia de buenos materiales de apoyo es uno de los aspectos más importantes para que un profesional o un alumno puedan aprender fácilmente una materia. Sin embargo, ocurre con frecuencia que se detecta la necesidad de cubrir carencias en los textos docentes. La redacción y maquetado de un texto, además de ser una tarea ingrata, no está suficientemente valorada y las personas que tienen los conocimientos no siempre tienen el tiempo, las ganas o la motivación necesaria para hacerlo.

Dentro de mi experiencia personal en la electrónica fui pronto consciente de la importancia de los fenómenos de interferencias electromagnéticas, pero también de que, aún habiendo buenos libros teóricos, faltaba algo que le diese sentido a esa teoría y que mostrase a los alumnos la importancia de las interferencias en casos reales, sirviendo además de elemento de motivación. Fue de este modo que comenzó a surgir la idea de redactar este libro.

Y no puedo sino mostrar mi alegría por que varios compañeros, con mayores conocimientos en el tema que yo, hayan aceptado participar en la redacción. La rapidez con la que todos han aceptado y la sintonía entre todos indica que mis inquietudes eran compartidas.

De este modo, el texto presenta una serie de casos prácticos de Compatibilidad Electromagnética. En cada uno se podrá encontrar una breve descripción, unos comentarios adicionales, casi siempre mostrando la solución, y una serie de actividades recomendables para que el lector trabaje en los conceptos asociados al caso.

Los autores queremos también agradecer la financiación de la Universidad de Zaragoza a través del siguiente proyecto de innovación docente en el que se originó este trabajo: "Diseño curricular de asignaturas en los ámbitos de la Electrónica y la Electricidad: aplicación del método del caso para la mejora de la docencia práctica de Compatibilidad Electromagnética", PIIDUZ 2008-3, Convocatorias de Innovación Docente 2008-2009 de la Universidad de Zaragoza.

Desgraciadamente, durante la preparación de este texto hemos tenido que lamentar el fallecimiento de uno de los participantes en el libro, Tomás Pollán, profesor de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial en la Universidad de Zaragoza, y persona de sobra conocido en el mundo de la docencia de la electrónica. Aunque me consta que tenía pensados varios casos, únicamente hemos recopilado la información completa de uno de ellos. Creo que lo mejor que podemos hacer es fijarnos en su ejemplo de dedicación a la docencia (perfectamente ilustrado por su libro de electrónica digital accesible en la red), de entrega y de reflexión continua. A él le hemos dedicado esta obra.

Carlos Medrano, Enero de 2010.

Página en blanco

Índice

1. Acoplamiento entre cables que transportan señales de audio	1
2. Electrocuación en una instalación de potencia	3
3. Apertura incontrolada de una puerta controlada por un portero automático	5
4. Efecto de la amplitud de la tensión de red sobre la calibración de un equipo industrial	7
5. Efecto del ruido de la red sobre la calibración de un multímetro	8
6. Resonancia de bancos de condensadores	9
7. Un dispositivo antirrobo sabotado por un móvil	11
8. ¿Qué hace un helicóptero en mi terminal TETRA?	13
9. ¿Dónde está mi USB?	18
10. Problemas con RoboTeruel	21
11. Ruido de masa en una aplicación con FPGA	25
12. La importancia de la impedancia de pista	28
13. Consideraciones sobre el ruido de masa y de alimentación en circuitos con Dispositivos Lógicos Programables	31
14. Ruido en una señal de reset de una placa de circuito impreso	34
15. Ruido en una señal de reset en una protoboard	39
16. Los cables de entrada y salida de un sistema digital de control como eficientes antenas receptoras de ruido en un ambiente industrial	42
17. Máquina expendedora de latas: problema derivado de interferencias por red desde enchufes cercanos	46
18. Experiencia de medida de EMC en el desarrollo de la primera encimera de cocina de inducción	47

Página en blanco

1

Acoplamiento entre cables que transportan señales de audio

Francisco Javier Arcega Solsona

Descripción

Se trata de un caso de un centro de mecanografía en el que se mezclaban los cursos dados de forma individual a cada alumno por el cruce de señales entre los cables.

En el centro de mecanografía se daban cursos individuales a los alumnos, basados en que cada alumno recibía su lección de modo individual. Desde la recepción del centro se le ponía al alumno su clase y éste con los cascos escuchaba lo que tenía que hacer en la máquina de escribir.

El instalador, muy eficiente, había colocado todos los cables que iban desde cada equipo individual en la recepción, situada en la entrada de la academia, hasta la sala de máquinas de escribir donde estaban los cascos en los que el alumno iba a escuchar su lección, todos los cables paralelos perfectamente colocados en un tubo empotrado hasta la sala de clase donde se separaban a cada puesto individual donde el alumno se ponía los cascos y tecleaba en la máquina.

De la recepción a la sala de clase había unos 5m y el recorrido común de los cables podía rondar los 10m. Para mantener los cables bien atados, el instalador había utilizado trozos de cable para amordazar los haces de los cables cada 30 ó 40cm aproximadamente y así garantizar una perfecta instalación.

El problema era que el alumno, al escuchar su clase, escuchaba otras clases a la vez. Por los cables se acoplaba la señal y llegaban tanto la señal que le correspondía como otras de otros puestos de la sala.

Actividad del alumno

Responde a las siguientes preguntas:

¿A qué crees que se debe el problema originado en el centro? ¿Hay algo del montaje que te llame la atención?

¿Qué soluciones propondrías?

Solución del caso y comentarios

El montaje era técnicamente correcto desde el punto de vista de la instalación. Los cables bien instalados y sin problemas aparentes, pero por las necesidades de la instalación al ser cables largos y paralelos ya hacían sospechar problemas de inducción entre ellos pero lo más importante es que los lazos realizados para mantener todos los cables juntos eran de cable (metálicos) por lo tanto aparecía un fenómeno de inducción de un cable sobre el lazo de sujeción y de éste con cualquiera de los otros cables, por lo que el cruzamiento de voces estaba asegurado.

Bastó con soltar los lazos de cable y colocarlos con bridas plásticas y el problema se solucionó por completo.

© 2010 Francisco Javier Arcega Solsona

2

Electrocución en una instalación de potencia

Francisco Javier Arcega Solsona

Descripción

Se trata de un caso de un caso de electrocución en una instalación de potencia por el hecho de inducción entre una línea alimentada y otra que en teoría estaba fuera de servicio.

En una instalación real se estaba produciendo la reparación de una línea de distribución de energía eléctrica próxima a otra, situadas en paralelo y la segunda de ellas estando en servicio. La primera línea estaba sin tensión pero desgraciadamente, en un momento determinado uno de los obreros cae mortalmente herido por efecto de una descarga eléctrica.

Había un par de líneas de alta tensión y alta corriente cercanas. Por necesidades de mantenimiento se descarga una de ellas y el obrero empieza a trabajar. En un momento dado, por la otra línea pasa una fuerte corriente, producida por un cortocircuito, por ejemplo. La corriente es tan elevada que es capaz de inducir en la línea cercana una tensión elevada capaz de matar al operario.

Actividad del alumno

Analizar teóricamente la situación para un caso de cables paralelos situados a 5 metros uno de otro y con una corriente de 1000 A pasando por uno de los dos estando el otro aislado. Analizar las posibles situaciones con el cable aislado, conectado por un lado solo a tierra y con los dos lados conectado a tierra.

Responde a las siguientes preguntas:

¿A qué se debió la aparición de la tensión que causó la muerte al operario?

¿Qué soluciones propondrías?

Solución del caso y comentarios

La línea cercana estaba en tensión y por un consumo normal para el que estaba prevista dicha línea, se produjo un aumento muy importante de corriente que dio lugar por efecto de la inducción electromagnética a la aparición de la tensión en la primera. Esta tensión inducida fue la causante de la muerte del trabajador.

Bastaría con colocar conexiones a tierra a ambos lados de la zona de la red en la que se están realizando los trabajos para asegurar que las tensiones inducidas se minimicen hasta extremos de hacerlas inocuas, solucionando el problema por completo y evitando riesgos innecesarios.

© 2010 Francisco Javier Arcega Solsona

3

Apertura incontrolada de una puerta controlada por un portero automático

Francisco Javier Arcega Solsona

Descripción

Caso del portero automático que abre la puerta bajo ciertas condiciones de señales de radiofrecuencia de un emisor cercano dejando la finca abierta.

La presencia de señales de alta frecuencia en el circuito electrónico del portero hace que en sus pistas se induzcan señales eléctricas que afectan a la decisión de abrir la puerta y el mecanismo abre aunque no haya habido usuario que haya pulsado para abrir. En este caso suele ser clave la forma de las pistas y no abre con cualquier frecuencia sino con una determinada que es la que produce la inducción suficiente en el circuito para producir el mismo efecto que la orden de apertura.

En una determinada vivienda urbana en la que se disponía de un portero automático, se detectó que este se abría inopinadamente dejando la finca abierta al público tanto de día como de noche. Aparentemente esto se producía al azar y al observar el portero, se detectó el efecto como si algún vecino diera la orden de abrir desde su piso. Tras repetidos avisos y observación se detectó que ningún vecino abría cuando se producía la apertura de la puerta. El portero funcionaba bien y abría cuando algún vecino daba la orden pero también se producía la apertura aleatoria.

Actividad del alumno

Responde a las siguientes preguntas:

¿Por qué abría el portero automático? ¿Qué crees que estaba pasando?

¿Qué soluciones propondrías?

Solución del caso y comentarios

El montaje de la placa de circuito impreso del portero automático tenía un pequeño problema y es que por su diseño se acoplaba a una frecuencia muy concreta que coincidía con la frecuencia que emitía una empresa que se encontraba cerca de la finca donde estaba situado el portero automático. Cada vez que la máquina de la empresa emitía la frecuencia perturbadora, el portero inducía una señal que activaba la apertura, con lo que la puerta se quedaba abierta.

Bastó con proteger la placa del circuito con una plancha metálica conectada a tierra para reducir la inducción de tensiones en las pistas y disminuir la señal inducida por debajo del umbral de apertura del portero para que el problema quedase solucionado por completo.

© 2010 Francisco Javier Arcega Solsona

4

Efecto de la amplitud de la tensión de red sobre la calibración de un equipo industrial

Francisco Javier Arcega Solsona

Descripción

Se trata de los errores producidos en la calibración de un equipo cuando la red no es la adecuada por las perturbaciones. Al realizar la calibración de un equipo de medida instalado en un polígono industrial, se detectó que el equipo no estaba dentro de sus especificaciones. Tras las comprobaciones pertinentes y al detectar que el equipo estaba bien y que aparentemente no tenía problemas, se volvió a calibrar obteniendo otros valores diferentes cuando no se había producido ningún ajuste al equipo y en principio la respuesta debería haber sido la misma.

Actividad del alumno

Responde a las siguientes preguntas:

¿Por qué fallaba el equipo?

¿Qué soluciones propondrías?

Solución del caso y comentarios

En este caso, el montaje del equipo estaba realizado de modo que las funcionalidades de medida se basaban en la señal de la red que recibía el equipo. Como el equipo estaba en una empresa de un polígono industrial, la señal de la red estaba muy distorsionada y variaba además de valores de amplitud entre 210 y 240V dependiendo de la hora de realizar la calibración. El resultado era que dependiendo de la hora y de cómo estaba la señal, el equipo se comportaba de diferente manera.

En este caso fue necesario sustituir la alimentación del equipo por una fuente de alimentación ininterrumpida para garantizar que los niveles de tensión de alimentación eran siempre los mismos y que la distorsión se mantenía siempre debajo del valor necesario para que el equipo midiese tal como estaba previsto y a partir de ahí las calibraciones realizadas fueron constantes al realizar las comprobaciones después de la introducción de la fuente quedando el problema solucionado por completo.

© 2010 Francisco Javier Arcega Solsona

5

Efecto del ruido de la red sobre la calibración de un multímetro

Francisco Javier Arcega Solsona

Descripción

Durante la calibración de un equipo de medida (multímetro) se detecta que el equipo mide mal. Aparece una tensión de amplitud fija de unos pocos milivoltios siempre en el mismo sentido. El operador puede pensar que es el equipo el que está mal pero decide probar otra posibilidad y conecta el equipo con cables apantallados. En esa situación comprueba que el error desaparece.

La posible causa es la existencia de una señal de alterna que se cuela por los cables que conectan el multímetro a la fuente y generan una tensión inducida. La presencia del cable apantallado reduce la señal inducida y el error desaparece.

Actividad del alumno

Realizar una medida con un multímetro, al menos de 5 ½ dígitos con dos cables paralelos y poniendo cerca una fuente de ruido, como un cable que lleve señales de cierta corriente y frecuencia de 1kHz. Observar las medidas con los dos cables paralelos, con el cable trenzado y con cable coaxial.

Responde a las siguientes preguntas:

¿Por qué fallaba el equipo?

¿Qué soluciones propondrías?

Solución del caso y comentarios

En este caso, el multímetro a calibrar recibe perturbaciones por el cable de señal que son detectadas por el circuito de medida y falseadas en la lectura.

En este caso fue necesario utilizar cables debidamente apantallados junto con las conexiones a tierra adecuadas, quedando el problema solucionado por completo.

© 2010 Francisco Javier Arcega Solsona

6

Resonancia de bancos de condensadores

Francisco Javier Arcega Solsona

Descripción

Cuando en un circuito que tiene un banco de condensadores se produce una resonancia, se pueden llegar a establecer tensiones muy elevadas que pueden perforar los aislamientos y dañar la instalación. Esta situación se puede producir en las instalaciones industriales que disponen de bancos de condensadores para corregir el factor de potencia. Cuando aparecen los armónicos, estos pueden llegar a producir una resonancia en el circuito, suficiente para elevar la tensión por encima de la que soportan los aislamientos de los equipos y dañarlos, produciendo incendio o perforación del aislamiento.

Se trata de analizar la posible resonancia que los bancos de condensadores pueden producir en una red de distribución y los posibles efectos perversos que se pueden producir en los equipos conectados a esa red.

Cuando en un circuito de distribución de energía eléctrica hay muchos equipos de potencia (motores) se suele producir un desfase entre la tensión y la corriente. Como este desfase acarrea problemas de potencia desperdiciada y consideraciones de diseño respecto al tamaño de los cables, en particular el de tierra, se suele recurrir a corregir el factor de potencia por la inclusión de bancos de condensadores.

En determinadas circunstancias y fundamentalmente, debido a los armónicos, se producen efectos resonantes entre las inductancias de los equipos y la capacidad del banco. Esto ocasiona sobretensiones en la red, que pueden originar efectos dañinos en los componentes que estén ubicados en dicha red, entre otros, rotura del aislamiento y por lo tanto pérdida de seguridad de la instalación.

Actividad del alumno

Analizar un circuito en el que estén presentes en serie, un efecto resistivo debido al cable de transporte, un efecto inductivo también debido al cable o al bobinado de una máquina eléctrica, y un efecto capacitivo debido al banco de condensadores para corregir el factor de potencia de la instalación. Si en lugar de estar solo la señal pura de 50Hz está además el tercer armónico (150Hz), analizar la magnitud de la tensión y determinar variando la inductancia de la red cuando se produce la resonancia y viendo el valor de la tensión que se alcanza en los distintos elementos del circuito

Responde a las siguientes preguntas:

¿Qué es lo que sucede en la instalación?

¿Qué soluciones propondrías?

Solución del caso y comentarios

El montaje en las instalaciones eléctricas de bancos de condensadores ha sido la solución tradicional para corregir el factor de potencia de dichas instalaciones, pero con el avance de la técnica y el aumento de armónicos en la red ha hecho que los diseños iniciales de los bancos, que dejaban muy lejana la posibilidad de resonancia entre el banco y los equipos eléctricos se haya visto modificada por la presencia de los armónicos tercero, quinto, séptimo, etc. Por lo tanto lo que se debe hacer es tener en cuenta la presencia de dichos armónicos a la hora de calcular el banco de condensadores, pero sobre todo tratar de reducir la presencia de dichos armónicos en la red mediante el uso de sistemas de corrección como filtros, tanto activos como pasivos.

Basta con diseñar mejor el banco de condensadores o colocar los filtros adecuados para que el problema se solucione por completo.

© 2010 Francisco Javier Arcega Solsona

7

Un dispositivo antirrobo saboteado por un móvil

Ana María López Torres

Descripción

Un sistema de identificación por radiofrecuencia RFID (Radio Frequency Identification) está formado básicamente por un lector o estación base RFID y una etiqueta o transpondedor. El primero de estos elementos emite una onda electromagnética que, cuando incide sobre la etiqueta, produce que ésta emita a su vez hacia el lector la información que tiene almacenada. Dentro de esta información, generalmente se incluye un código de identificación único que permite diferenciar esta etiqueta de cualquier otra. Asociando esta etiqueta a un determinado objeto o ser vivo, lo que se consigue es su identificación de forma segura. El lector RFID puede además, también a través de la onda electromagnética, grabar nueva información en la memoria de la etiqueta. Esto permite, por ejemplo, monitorizar el proceso de producción de un producto guardando el valor de los diferentes parámetros que determinan ese proceso productivo (condiciones ambientales, operario que se ha ocupado de los diferentes procesos, origen de las materias primas, fechas de interés...) de manera rápida e integrada en la propia cadena de producción, ya que la comunicación por radiofrecuencia, no requiere una perfecta alineación entre lector y etiqueta, como por ejemplo ocurre con la lectura de los códigos de barras usando escáneres ópticos. Es por ello que la tecnología RFID se está aplicando cada vez más en los procesos de trazabilidad y logística. También son la base de funcionamiento de muchos dispositivos antirrobo que se utilizan en los comercios. Un lector RFID a la salida del establecimiento detecta la salida del artículo si la etiqueta que contiene no ha sido desactivada en caja.

Explicación del efecto detectado:

Los sistemas RFID se dividen en tres tipos en función de la banda de frecuencia en la cual emiten sus señales:

- Sistemas de baja frecuencia (LF, Low Frequency): 125 – 145 kHz.
- Sistemas de alta frecuencia (HF, High Frequency): 13,56 MHz.
- Sistemas de frecuencia ultra alta (UHF, Ultra High Frequency): 868 MHz y 2,45 GHz.

Los lectores RFID emiten diferentes señales utilizando esas frecuencias como frecuencias portadoras. La etiqueta capta estas formas de onda con su antena y, bien modulando la señal procedente del propio lector (etiquetas pasivas) bien utilizando su propia energía (etiquetas activas), envía información de vuelta al lector. La distancia a

la que se pueden situar ambos elementos para que la comunicación tenga éxito depende de varios factores:

- Potencia de emisión de la estación base.
- Utilización de etiquetas activas o pasivas.
- Rango de frecuencia de trabajo.
- Diseño y calidad de las antenas de ambos elementos.
- Presencia de factores que interfieran en la comunicación.

En el ámbito de este libro, es el último de estos factores el que más nos interesa. La presencia de superficies metálicas con elevados coeficientes de reflexión produce efectos no deseados de propagación multicamino que pueden disminuir drásticamente la potencia de las señales recibidas. Si las ondas deben de atravesar diferentes materiales hasta llegar a la etiqueta, hay que considerar los coeficientes de absorción de estos medios, así como su dependencia con la frecuencia. Por ejemplo, la presencia de líquidos y humedad en el camino de propagación tiene efectos más graves en el caso de sistemas UHF.

Por último, no podemos evitar la presencia de otras ondas electromagnéticas con frecuencias similares que al interferir con las ondas RFID disminuyan el alcance de estos sistemas. Estaríamos hablando de interferencias radiadas no naturales de tipo intencionado. Un ejemplo muy próximo es la red GSM de telefonía móvil, una de cuyas bandas de transmisión está en 900 MHz, muy cerca de una de las bandas de los sistemas RFID de UHF. Igualmente, la comunicación GSM se ve perjudicada por la presencia del sistema RFID. Para explicar este efecto deseado sólo hay que recordar el principio de superposición que cumplen dos ondas electromagnéticas que coinciden en el espacio y en el tiempo y el rango de amplitud que podemos encontrar en la onda resultante.

¿Podríamos con nuestro teléfono móvil disminuir el rango del lector antirrobo y salir con un artículo sin haber pasado por caja?

Actividad del alumno

- Explicar por qué la presencia de dos ondas electromagnéticas de igual frecuencia en un mismo punto puede dar lugar a la anulación de la potencia electromagnética en dicho punto.
- ¿En qué condiciones puede nuestro móvil anular el funcionamiento del sistema antirrobo?
- ¿Cuáles son los métodos más usuales contra las interferencias radiadas de forma intencionada? ¿Podrían utilizarse en este caso concreto? ¿Qué solución sugieres?

8

¿Qué hace un helicóptero en mi terminal TETRA?

Ana María López Torres

Descripción

Las siglas TETRA (<http://www.tetramou.com/>) representan a Terrestrial Trunked Radio. Es un estándar de comunicaciones radio digitales que se utiliza en redes privadas, muy extendido en los sistemas de comunicación que utilizan cuerpos de seguridad.

Un usuario de este tipo de terminales, habla directamente a un micrófono a través de un sistema *Push To Talk*, PTT. La señal de voz es transformada en una señal de potencial por el sensor acústico, en este caso un micrófono electret.

Los micrófonos tipo electret son una variante de los micrófonos de condensador. Los micrófonos de condensador son el tipo de sensores acústicos más utilizados en las aplicaciones tradicionales. La base del micrófono de condensador es muy simple. Se forma un condensador de placas plano paralelas con una placa metálica fija y un diafragma que se desplaza bajo la acción de las ondas de presión sonora. En función del valor de la presión se producirá un desplazamiento mayor o menor del diafragma, modificándose de igual manera la capacidad del condensador formado. Se sitúa este condensador en un divisor de tensión y se mide el potencial entre los bornes del condensador. Este potencial de salida reproduce las variaciones de presión sonora. Se trata pues de un sensor capacitivo que mide presión sonora. En la figura 1 se puede observar un esquema de este tipo de transducción:

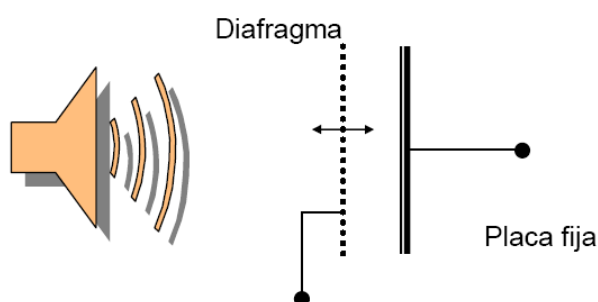


Figura 1. Micrófono electret.

Los micrófonos tipo electret son micrófonos de condensador en los que la placa metálica presenta siempre una distribución de carga no nula (se dice que el micrófono está prepolarizado). Esto se consigue con un polímero aplicado sobre la placa del condensador que posee cargas eléctricas fijas y que polariza por contacto dicha placa.

La información capturada por el micrófono es codificada y se envía utilizando una modulación digital $\pi/4$ DQPSK sobre una portadora de alta frecuencia en un rango de 400 a 900 MHz. La señal se emite de manera inalámbrica y llega al receptor que demodula la información recuperándose la señal de voz. Cada vez que ocurría esto, junto con la voz del hablante se escuchaba un molesto patrón de audio, similar al sonido que producen las aspas de un helicóptero, que resultaba muy molesto en la comunicación.

Solución del caso y comentarios

En los sistemas de comunicación se utilizan técnicas de multiplexación que permiten el aprovechamiento de los recursos del canal por parte de diferentes usuarios. En este caso, se utiliza la técnica de distribución de tiempo (TDMA: Time Division Multiple Access) que consiste en que varios usuarios emiten por el mismo canal (misma banda de frecuencias) pero en intervalos (slots) de tiempo diferentes. Así, la portadora sinusoidal de cada terminal se transmite durante 14,15 ms permaneciendo en silencio un periodo de 56,6 ms. Un esquema de esta transmisión, en el que la señal modulada se ha sustituido por una sinusoidal, aparece en la figura 2. Las altas potencias de emisión hacen que la energía radiada se acople al micrófono electret y pueda llegar a la entrada del circuito de audio.

La señal recibida por el micrófono debe ser debidamente acondicionada, el circuito de acondicionamiento incluye diodos que actúan como elementos rectificadores que al actuar sobre esta señal interferente eliminan las variaciones de alterna, obteniéndose una señal como la que se observa en la figura 3. No es necesario la presencia de un diodo para producir este tipo de rectificación, cualquier unión p-n presente en el propio sensor puede producir este efecto.

Esta onda cuadrada llega, junto con la señal de voz capturada con el micrófono, a la entrada del sistema digital que debe muestrear, codificar y modular la información a transmitir en soporte radio. El ancho de banda de una señal de voz se establece entre 20 Hz y 10000 Hz, aunque para una transmisión correcta (ejemplo telefonía) basta con una transmisión hasta 4 kHz. Por lo tanto, en estos sistemas se implementan filtros paso bajo que eliminan las componentes de ruido e interferencias de alta frecuencia fuera del rango espectral de la señal de interés. Sin embargo, si analizamos el espectro de nuestra señal interferente podemos comprobar, ver figura 4, como aparecen armónicos en las frecuencias que no eliminarán los filtros.

Los armónicos más bajos, aquellos que poseen más energía, son los responsables del efecto no deseado. Se suman a la señal de voz y junto con ella se modulan sobre la portadora que se transmitirá al receptor. Éste, junto con la voz del emisor, escuchará un molesto sonido periódico de fondo.

Si, por el contrario, la señal interferente no hubiera sido rectificada, su espectro se habría desplazado centrándose en la frecuencia de la señal portadora. Por tanto, no hubiera tenido componentes con energía elevada en las bajas frecuencias y sería eliminada por el filtro paso bajo.

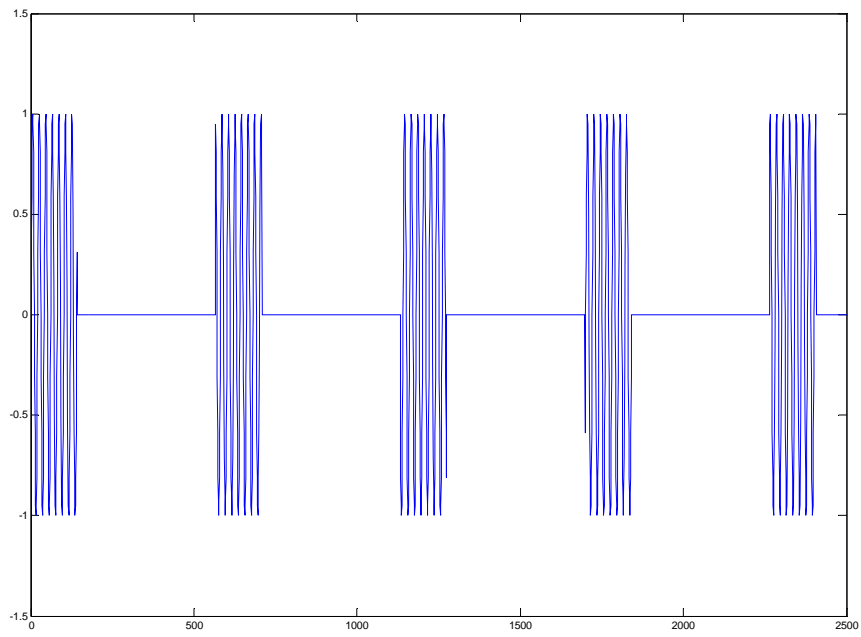


Figura 2. Esquema de la señal transmitida por un terminal TETRA. Multiplexación TDMA

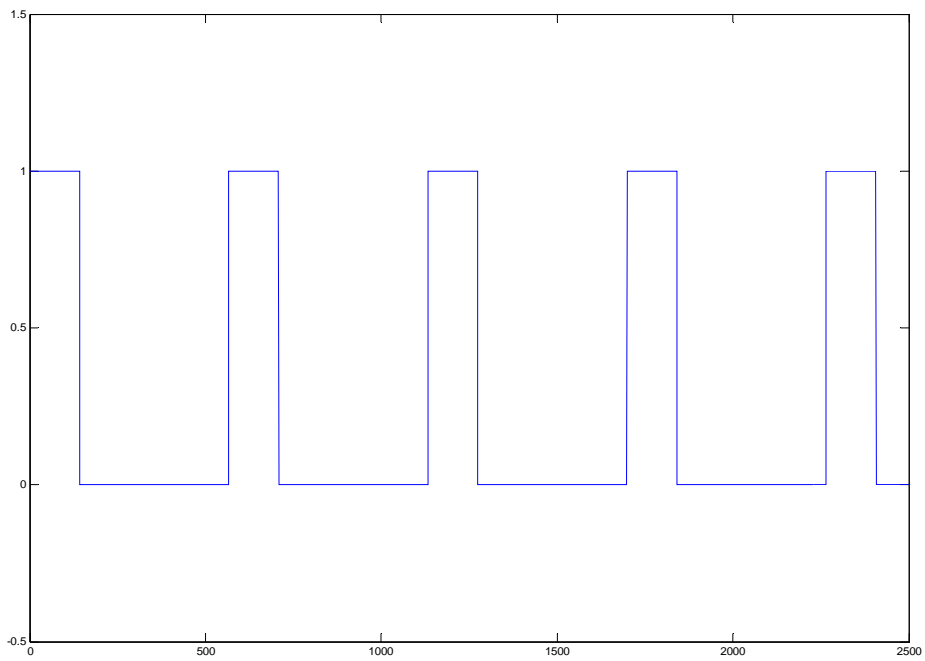


Figura 3. Rectificación ideal de la señal de la figura 2.

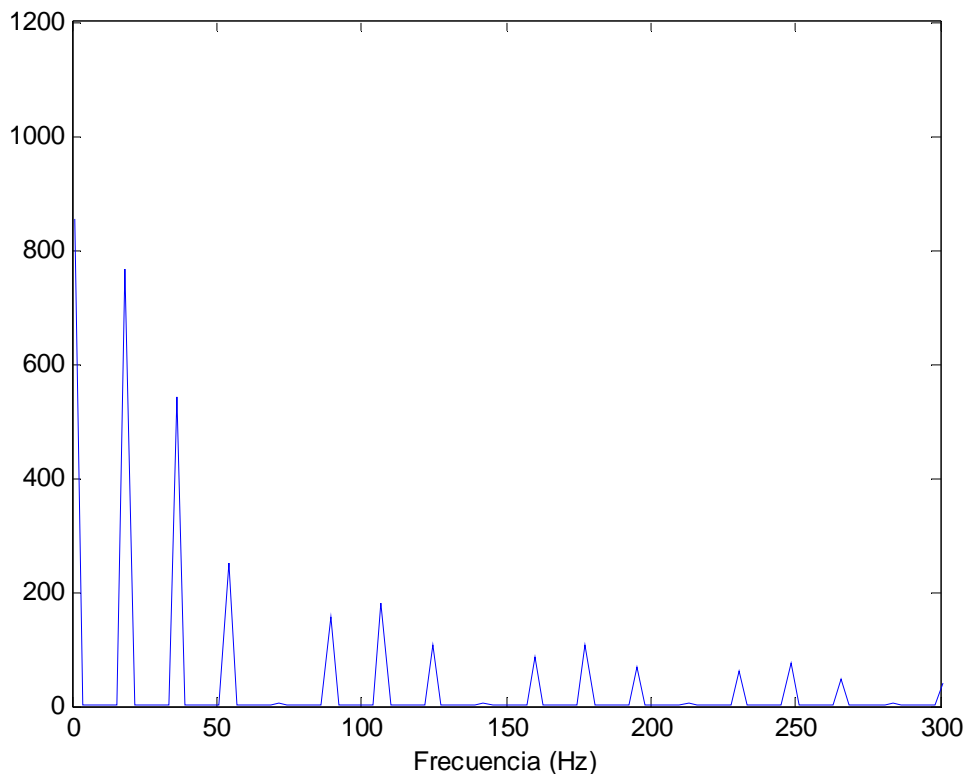


Figura 4. Espectro de la envolvente cuadrada representada en la figura 3.

Solución:

La solución que se decidió aplicar para evitar este efecto se basa en impedir la rectificación de la señal de interferencia para que fuese eliminada posteriormente por el filtro paso bajo del sistema de audio. Para ello se situó un condensador de desacoplo entre los pines del micrófono electret para evitar el proceso de rectificación que puedan producir las uniones p-n en el sensor. Este condensador presenta una impedancia muy baja para altas frecuencias. Como consecuencia, la señal interferente no pasa por el diodo (de mayor impedancia) y no se rectifica. Para la señal de audio, sin embargo, la impedancia del condensador de acoplo es muy grande, prácticamente equivalente a un circuito abierto, por lo que la presencia de este condensador no afecta a la señal de audio que se desea transmitir. Un esquema del circuito se muestra en la figura 5.

Para la elección correcta del condensador de desacoplo es necesario tener en cuenta la frecuencia que queremos que circule por este camino de baja impedancia. Supongamos una frecuencia portadora de 480 MHz. Si se considera el modelo CLR en serie para el condensador, una opción válida sería elegir un componente de 220 pF con ESL (Equivalent Serie Inductance) = 0.5 nH y ESR (Equivalent Serie Resistance) = 0.1 Ω .

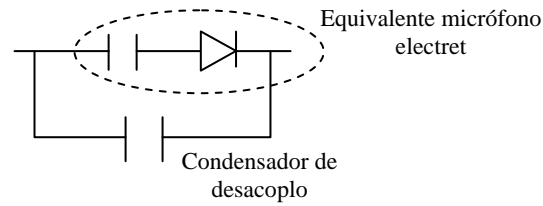


Figura 5. Condensador de desacoplo que evita la rectificación de la señal

Actividad del alumno

- Dibuja la envolvente cuadrada que se produce sobre la señal a transmitir por efecto de la multiplexación TDMA. ¿Cuáles son los valores numéricos de su periodo y ciclo de trabajo?
- Supón que la señal a transmitir es simplemente una onda sinusoidal de frecuencia muy superior que la de la onda cuadrada dibujada antes. Dibuja la señal transmitida por el terminal TETRA que va a actuar como señal interferente.
- ¿En qué consiste la rectificación de una onda? Dibuja la salida ideal de un rectificador de onda completa cuando la entrada es la señal interferente.
- Realiza la descomposición en serie de Fourier de esta onda cuadrada. Dibuja el espectro obtenido.
- ¿Cómo se modifica este espectro si se supone que la señal no ha sido rectificada? ¿Por qué el filtro paso bajo sí es capaz de eliminar la interferencia en este caso?
- ¿Por qué el condensador que se menciona en el texto es apropiado para resolver el problema que se plantea?

9

¿Dónde está mi USB?

Ana María López Torres

Descripción del caso:

Volvemos de nuevo a describir un caso relacionado con los terminales TETRA y con sus altas potencias de emisión. La personalización de un terminal TETRA (definición del número de teléfono, configuración de la agenda, determinación de la frecuencia de trabajo) se realiza desde un PC al que se conecta el terminal a través de una conexión USB. Tras el proceso de reprogramación del equipo, este vuelve a registrarse en la red TETRA, para ello emite ondas de radio. El acoplo de esta radiación al cable del USB hace que el PC desconecte este puerto que no aparece más en Windows.

Solución del caso y comentarios

Las especificaciones eléctricas del estándar USB 2.0 describen un conector estándar de 4 pines tal y como se puede ver en la tabla 1:

Número de Pin	Nombre	Descripción
1	Vcc	Alimentación 5 V
2	D -	Transmisión de datos. Polaridad negativa.
3	D +	Transmisión de datos. Polaridad positiva.
4	GND	Tierra.

Tabla 1. Señales del conector USB 2.0

La transmisión de datos se realiza de forma diferencial a través de las líneas D+ y D-. Estos dos cables forman un par trenzado para incrementar la inmunidad frente a ruido e interferencias. La comunicación es del tipo Half Duplex. La codificación utilizada es NRZI (Nonreturn to Zero, invert on ones). Para los bajos los niveles de potencial están comprendidos entre 0 y 300 mV siendo de ± 400 mV para los niveles altos. La tasa de transferencia de datos es de hasta $12 \cdot 10^6$ bits/s en el estándar 1.1 y de hasta $480 \cdot 10^6$ bits/s en la versión 2.2.

La incidencia de un campo electromagnético externo sobre una línea de transmisión, genera un término de corriente extra que se suma a la onda de intensidad a través de la cual se transmite la información. Esta interferencia produce una señal errónea que conduce a la desconexión del puerto USB por parte del ordenador. Un hub USB tiene la posibilidad de detectar un exceso de corriente (uno de sus bits de estado PORT_OVERCURRENT recoge esta información). Cuando esto sucede, los puertos de conexión pasan al estado de no alimentación (Powered-off state), lo que produce su desaparición en el conjunto de dispositivos accesibles.

Para obtener más información sobre este tipo de conexión y su estándar podéis consultar:

http://es.wikipedia.org/wiki/Bus_de_Serie_Universal

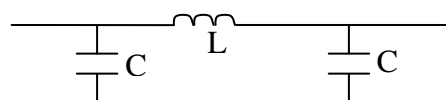
<http://www.usb.org/home>

Solución

La forma más usual de eliminar las interferencias de tipo radiado que son capturadas por un cable que actúa como antes es el apantallamiento de dicho cable. Se utiliza una malla metálica que rodea el conjunto de cables internos que transmiten la información. De esta manera las corrientes inducidas por el campo electromagnético externo circulan por esta pantalla en lugar de por los cables que transmiten la información. Esta malla debe de estar correctamente conectada a masa para su buen funcionamiento.

Imperfecciones en el apantallamiento pueden producir que parte de esta corriente pueda difundirse a la línea de transmisión interna. Esta consecuencia se evalúa con el parámetro impedancia de transferencia que establece la relación entre la corriente generada por la onda electromagnética en la pantalla y el campo eléctrico que se genera en el conductor interno. Esta impedancia de transferencia se reduce para pantallas gruesas formadas por conductores con alta resistividad (en los que la penetración del campo electromagnético es muy pequeña).

Otra posibilidad es el filtrado de la señal teniendo cuidado de no eliminar la señal de interés. Esta señal de información la podemos visualizar como una onda cuadrada cuyo periodo puede ser determinado por la velocidad de transmisión de datos. Para una correcta transmisión se debería permitir la llegada de al menos 5 armónicos de esta frecuencia. Con este límite en mente se deben de elegir los componentes del filtro a la salida de los cables USB (lo más cerca posible de esta salida para que la longitud de las pistas antes del filtro no se excesivamente larga). Una opción típica es un filtro tipo Pi como el que aparece en la imagen:



Actividad del alumno

¿Qué efectos negativos se pueden producir en la información transmitida por un cable o línea de transmisión cuando incide sobre él un campo electromagnético exterior?

¿Para qué situaciones estos efectos son importantes?

¿Cuáles son las principales técnicas utilizadas para luchar contra las interferencias radiadas?

¿Qué propiedades debe de cumplir una buena pantalla?

¿Qué frecuencia de corte debería tener el filtro, si la conexión USB cumple el estándar 1.1? Realizar un diseño del circuito correspondiente. ¿Qué ocurre si el estándar de la conexión es el 2.0? (La banda de frecuencias de comunicación TETRA se sitúan en el rango de 400 a 900 MHz).

© 2010 Ana María López Torres

10

Problemas con RoboTeruel

Carlos Tomás Medrano Sánchez

Descripción

Un robot móvil con ruedas está constituido fundamentalmente por estas partes:

- Una plataforma mecánica con motores y con ruedas 4x4. Constituye la base mecánica del robot y puede moverse con agilidad.
- Una batería recargable de 7,2 V como alimentación primaria de todo el circuito.
- Una controladora de motores, MD22. Este circuito se ataca con señales digitales y su salida controla los motores. De este modo nos evitamos la molestia de trabajar directamente con ellos.
- Unos sensores de ultrasonidos integrados. El sensor debe ser disparado periódicamente y devuelve un pulso cuya anchura me permite conocer la distancia del objeto detectado.
- Una placa con un microcontrolador que permite manejar el robot y tomar decisiones sobre su movimiento.

En la figura 1 podemos observar una visión frontal del robot, con los sensores de ultrasonidos, y otra de la placa de microcontrolador inicialmente utilizada.



Figura 1. Imágenes de RoboTeruel: izquierda, visión frontal; derecha, placa del microcontrolador

Se pretendía mejorar y ampliar el sistema cambiando el microcontrolador utilizado y añadiendo un GPS. Además, se ideó un sistema para usar un sólo sensor de ultrasonidos. Como se ve en la figura 1, hacían falta dos sensores para cubrir todo el campo de avance frontal. Para evitarlo se propuso utilizar un pequeño motor servo sobre el que se montaba el sensor de ultrasonidos. El giro del servo permitía hacer un barrido de 180 ° en la parte delantera del robot.

En la figura 2 podemos ver las distintas partes del montaje de prototipo:

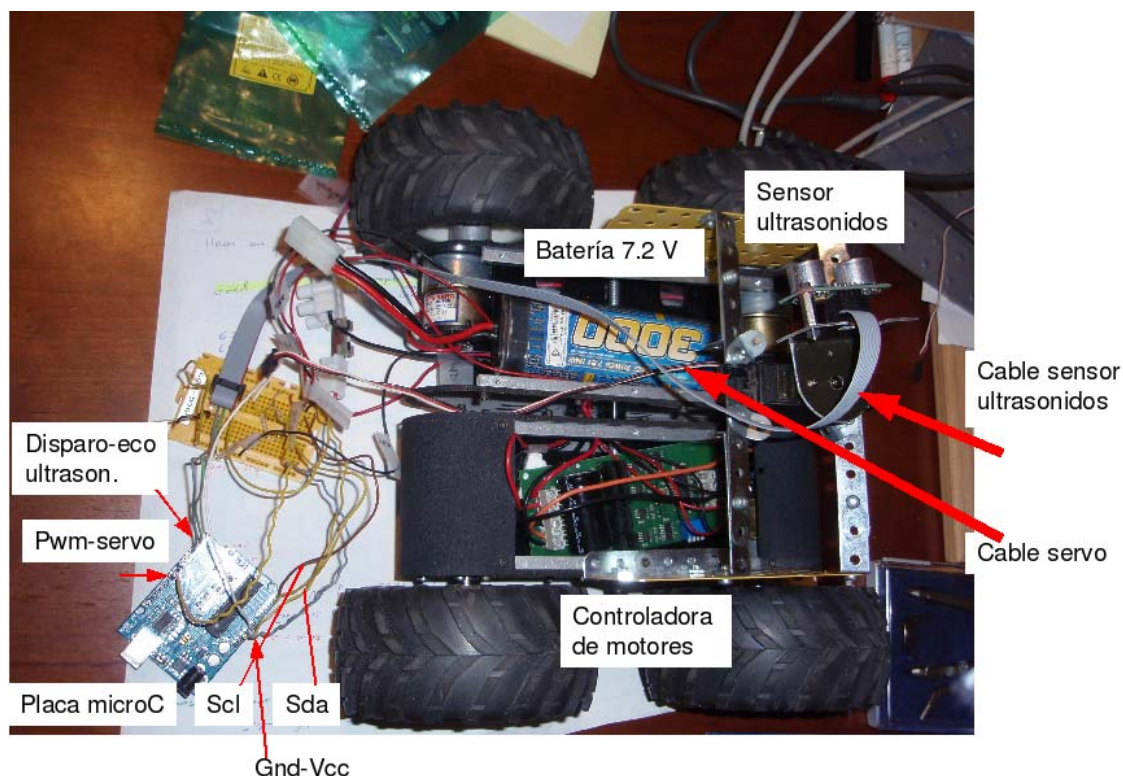


Figura 2. Prototipo de RoboTeruel con la nueva disposición del sensor de ultrasonidos y la nueva placa del microcontrolador

La comunicación con la controladora de motores se realiza a través del bus I2C que tiene una línea de datos serie (sda) y una línea de reloj (scl). Junto con ellas van masa y Vcc. Es un bus ideado por Philips que permite enviar datos en serie pero con una cierta estructura, de forma que se pueden direccionar chips distintos en ese bus. Por otro lado el servo tiene un indicador de posición codificado con una modulación de anchura de pulsos, PWM. La placa del microcontrolador se puede alimentar de forma independiente con una pila de 9 V, y esta fue la opción que se eligió en principio, de forma que esa misma placa puede alimentar a otros sistemas. Un esquema eléctrico aproximado es aparece en la figura 3 (nota: el GPS del esquema no aparece en la figura 2).

El problema detectado es el siguiente: en teoría el robot debía cambiar el movimiento al detectar obstáculos. El movimiento del robot se cambia escribiendo en un registro de la controladora de motores a través del bus I2C. Sin embargo, se observa un movimiento del motor errático. Parece que se intenta escribir correctamente en la controladora de motores, pero al leer el registro a través del I2C nunca se recupera el valor esperado, hay un bit que falla. Si el motor servo usado en el barrido de ultrasonidos no está activado, todo va bien.

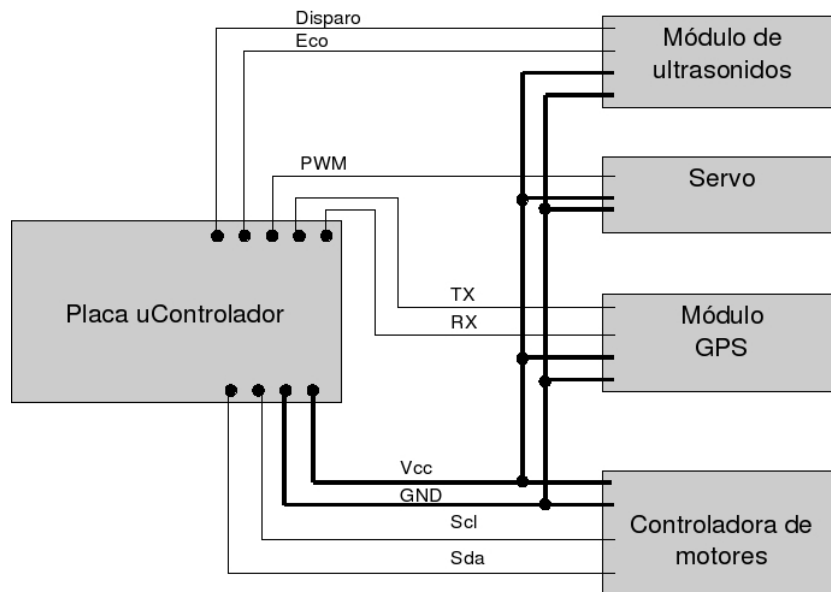


Figura 3. Esquema eléctrico de la nueva versión de RoboTeruel

Actividad del alumno

Comenta lo que te parezca oportuno sobre el prototipo probado e intenta dar algún consejo para que su sistema pueda funcionar.

Solución del caso y comentarios

La verdad es con ese montaje de cables tenemos un candidato perfecto a tener problemas de ruido: cables largos, sin trenzar y formando grandes bucles.

En el esquema eléctrico podemos ver que hay un problema de impedancia común. Por los síntomas que se explican, probablemente se trata de un ruido generado por el servo. Es evidente que un montaje definitivo en placas de circuito impreso permitiría minimizar el ruido, pero no lo es menos la necesidad de hacer pruebas previas. En este caso, los problemas se solucionaron ya en la etapa de pruebas previas en protoboard siguiendo estos consejos:

- En general, tener más cuidado a la hora de disponer los cables. Trenzar los cables incluso en protoboards.
- Alimentar el servo de forma independiente (subsistema de potencia), de forma que su retorno no influya en el resto del sistema. Dado que tenemos una batería de 7,2 V, lo mejor puede ser reducir esos 7,2 a 5V y con esos alimentar el servo. El microcontrolador se podía alimentar también a 7,2V, ya que internamente la placa del microcontrolador utilizada lo convertía a 5V. Estos 5V podían alimentar al resto de sistemas. Un esquema aproximado es el de la figura 4.

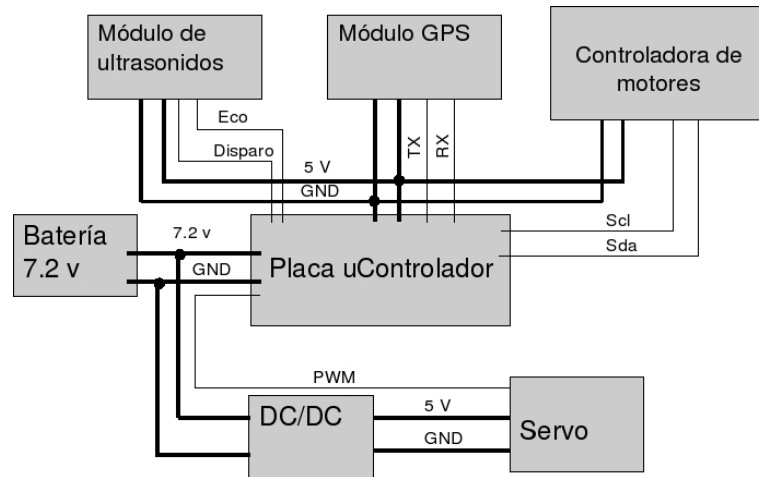


Figura 4. Esquema eléctrico mejorado de RoboTeruel para evitar problemas de impedancia común

Hay que tener en cuenta que, en realidad, se utilizó una placa de microcontrolador ya fabricada. Se intentó seguir el esquema anterior en la medida de lo posible, mediante otras placas que se iban montando unas encima de otras. En todo caso, la alimentación del servo iba separada, lo cual permitió resolver los problemas de ruido inducido en el bus I2C.

Nota: Los motores que mueven las ruedas del robot se alimentan directamente de la batería, de forma independiente.

© 2010 Carlos Tomás Medrano Sánchez

11

Ruido de masa en una aplicación con FPGA

Carlos Tomás Medrano Sánchez

Descripción

Un proyectista estaba realizando su trabajo fin de carrera con una implementación de un filtro digital en una FPGA de la familia FLEX10K de Altera. Estos dispositivos programables pueden contener diseños digitales complejos, implementados con la ayuda de entornos como MaxPlusII y lenguajes como VHDL, Verilog o mediante entrada de esquemáticos. En concreto se utilizó una FLEX10K20RC240, un dispositivo de 240 pines y formato PQFP. En la figura 1 se muestra la placa de evaluación utilizada (UP1) de Altera.

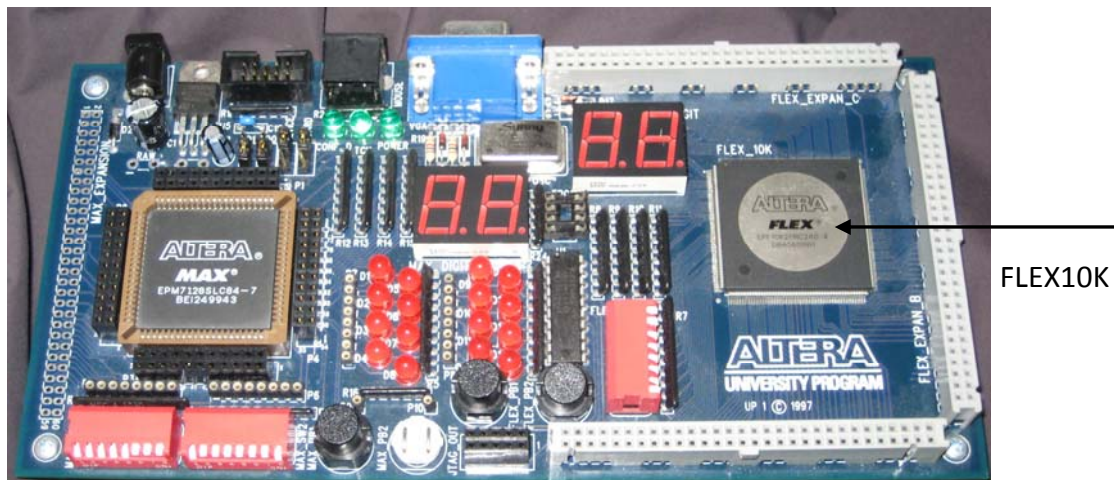


Figura 1. Fotografía de la placa UP1 de Altera utilizada

El diseño digital consistía en un filtro FIR, un diseño que necesita numerosas operaciones aritméticas. La entrada era una señal de 8 bits (podemos pensar que es una señal de audio analógica tras pasar por un convertor D/A), y la salida, una señal de un número elevado de bits (16 o 32). Eligiendo adecuadamente los coeficientes del filtro, se puede conseguir que la salida sea, por ejemplo, la entrada filtrada (paso alto, bajo, paso banda), tras pasar por una serie de etapas aritméticas y con un retraso de varios ciclos de reloj.

Tras comprobar concienzudamente el diseño en el simulador de MaxPlusII, el proyectista intentó verificar el diseño utilizando uno de los pulsadores como entrada de reloj y el conjunto de 8 switches como entrada. Al principio tuvo problemas debido a los rebotes del pulsador, pero los solucionó utilizando un pulsador externo en una protoboard con un circuito RC. Para verificar el correcto funcionamiento del sistema, colocó LEDs en las salidas con ayuda de otra protoboard, con cables entre la UP1 y la protoboard, incluyendo uno de masa, y fue ejecutando su algoritmo ciclo a ciclo de

reloj. Al principio observó que todo iba bien, pero a los pocos ciclos de reloj nunca obtenía el resultado correcto a la salida. Probaba varias veces, pero con la misma entrada, no siempre obtenía un resultado erróneo en el mismo momento. Desconcertado, quitó los LEDs y se fijó en un único bit de salida con ayuda de un osciloscopio, para observar si existía algún problema en la señal. Sorprendentemente, al quitar los LEDs, el bit siempre tenía un valor correcto en el osciloscopio, incluso aunque avanzase un gran número de ciclos de reloj. En el momento que volvía a poner LEDs en todas las salidas, volvían a producirse fallos en algún momento.

Actividad del alumno

Responde a las siguientes preguntas:

- ¿Por qué no funcionaba el diseño con los LEDs en las salidas? ¿Con qué conceptos de interferencias electromagnéticas puede relacionarse el problema de este estudiante?
- ¿Cuáles son los factores claves que determinan que se produzca un error? ¿Se produciría un error si colocásemos LEDs en unos pocos bits de salida?
- ¿Cómo podrías comprobar un diseño con muchas salidas digitales? Haz los comentarios que creas oportunos sobre el intento de visualizar las señales de salida del proyectista.

Solución del caso y comentarios

Si el proyectista ha colocado LEDs con cables en las señales de salida más un cable de masa, todas las señales comparten un mismo retorno. Por tanto, tenemos un problema de impedancia común. Cuando tenemos una impedancia común, el retorno de una señal puede crear un ruido sobre ella, afectando al sistema y provocando una diferencia de potencial entre masas del sistema. Este problema será más acusado cuanto más salidas haya conectadas a leds.

El ruido en la impedancia común es debido sobre todo a la componente inductiva, y va a depender de varios factores: los bucles de la señal, las variaciones de intensidad y el tiempo en el que se producen. Al tratarse de un sistema cableado y con un único cable de masa, los bucles de corriente serán sin duda muy grandes, aumentando la autoinducción. Por otro lado, los LEDs consumen corriente, y tenemos un gran número de salidas. Por ello, cuando se produzca un cambio en muchos valores de las salidas, la variación de intensidad será apreciable. Todos estos problemas no aparecen al colocar el osciloscopio sobre una sola salida y eliminar los LEDs del resto.

En este caso, es mejor adoptar alguna estrategia para no colocar todas las salidas con LEDs. Por ejemplo, podríamos hacer lo siguiente:

- Obtener los bits de salida en serie, inhabilitando el filtro y habilitando un registro de desplazamiento.
- Obtener sólo cierta información sobre la salida, por ejemplo un bit de paridad total, o por grupos de bits. Aunque esto no es tan exhaustivo, sirve para detectar muchos errores.
- Incluir los valores esperados para unas entradas dadas en los bloques de memoria RAM de la FPGA, de forma que el propio circuito comprobase el resultado.
- Utilizar métodos más refinados de test, como el Boundary Scan. Altera ofrece un lenguaje de descripción del Boundary Scan, denominado BSDL por sus siglas en inglés. La información se puede consultar en la web de Altera.

© 2010 Carlos Tomás Medrano Sánchez

12

La importancia de la impedancia de pista

Carlos Tomás Medrano Sánchez

Descripción

Una placa de circuito impreso contenía un módulo GPS (Tyco A1037-A). El módulo GPS necesita una pista para la conexión a la antena, e incluye también un puerto serie para comunicarse con un microcontrolador. A través del puerto serie se comunica la posición actual mediante cadenas de caracteres que siguen el protocolo NMEA. Este protocolo nos indica el formato de las frases que emiten los receptores GPS, para los sistemas conectados al GPS puedan extraer los datos de interés. Ha sido definido por la *National Marine Electronics Association*.

A pesar de que el sistema era sencillo, el microcontrolador no conseguía obtener correctamente ningún tipo de información del GPS. Tras repasar las conexiones y el programa del microcontrolador, se llegó a la conclusión de que el problema estaba en la recepción. El diseñador de la placa había trazado las pistas de conexión del módulo GPS sin tener ningún cuidado especial. En la hoja de características del módulo se daban una serie de recomendaciones sobre el trazado de pistas.

Actividad del alumno

¿Puedes anticipar qué tipo de recomendaciones dará el fabricante sobre la pista de la antena del módulo GPS?

Solución al caso y comentarios

Las señales que se transmiten por las pistas de circuito impreso pueden degradarse. Para mantener la integridad de la señal, las pistas deben tener una impedancia controlada y es necesario terminirlas de forma adecuada para evitar reflexiones de señal indeseadas. Este problema se manifiesta sobre todo en señales con contenido en alta frecuencia, por ejemplo con flancos abruptos. La señal de la antena es un claro ejemplo, por lo que seguir las recomendaciones del fabricante del módulo GPS es determinante para asegurar una buena recepción.

En la hoja de características del dispositivo, se indica que la pista de la antena debe tener una impedancia de 50Ω . La línea debe ser lo más corta posible, y los pines de tierra junto a la señal de la antena deben estar unidos al plano de masa de la placa. Como ejemplo, se propone una estructura de *microstrip*, y se indica que para una placa de espesor 0,8 mm y de material FR4, la anchura debe ser de 1,44 mm.

Vamos a intentar comprobar esos datos que nos da el fabricante. Tomemos los parámetros que aparecen en la figura 1.

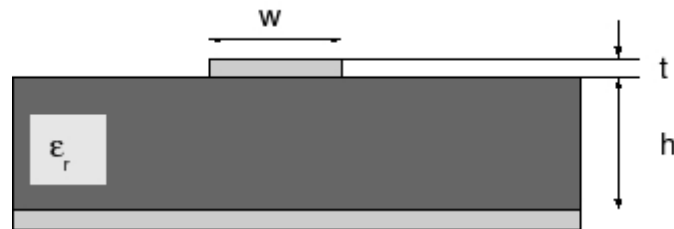


Figura 1. Esquema de la configuración microstrip

Podemos encontrar en los libros estas fórmulas aproximadas para la impedancia de pista:

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln\left(\frac{8h}{w} + 0,25 \frac{w_e}{h}\right) \Omega \quad \text{si } w/h \leq 1$$

$$Z = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e}} \left[\frac{w_e}{h} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{w_e}{h} + 1,444\right) \right]^{-1} \Omega \quad \text{si } w/h > 1$$

y donde

$$\frac{w_e}{h} = \frac{w}{h} + \frac{1,25}{\pi} \frac{t}{h} \left(1 + \ln \frac{4\pi w}{t}\right) \quad \text{si } w/h \leq 1/(2\pi)$$

$$\frac{w_e}{h} = \frac{w}{h} + \frac{1,25}{\pi} \frac{t}{h} \left(1 + \ln \frac{2h}{t}\right) \quad \text{si } w/h > 1/(2\pi)$$

$$\epsilon_e = \left[\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} f(w/h) \right] - C$$

con, a su vez, estas definiciones:

$$C = \frac{\epsilon_r - 1}{4,6} \frac{t/h}{\sqrt{w/h}}$$

$$f(w/h) = (1 + 12h/w)^{-1/2} + 0,04(1 - w/h)^2 \quad \text{si } w/h \leq 1$$

$$f(w/h) = (1 + 12h/w)^{-1/2} \quad \text{si } w/h > 1$$

Si en las ecuaciones anteriores, utilizamos estos valores:

Permitividad relativa $\epsilon_r=4,7$ (valor típico para el material FR4)

Espesor del cobre: $t=0,035$ mm (35 μm , el más habitual)

Espesor de la placa: $h=0,8$ mm

Anchura de pista. $w=1,44$ mm

el resultado es que la impedancia de pista es 49,46 Ω , en efecto cercano a los 50 Ω que se recomiendan.

© 2010 Carlos Tomás Medrano Sánchez

13

Consideraciones sobre el ruido de masa y de alimentación en circuitos con Dispositivos Lógicos Programables

Inmaculada Plaza García

Descripción

Los fabricantes proporcionan abundante información sobre muchos aspectos del diseño práctico con circuitos electrónicos. Se pueden encontrar numerosos documentos (notas de aplicación, o similar) que se refieren a cuestiones relacionadas con perturbaciones electromagnéticas. Por ejemplo:

- Understanding and eliminating EMI in microcontroller applications, AN 1050 de National Semiconductor.
- EMI/RFI Board Design, AN 643 de National Semiconductor.
- PCB Design Guidelines For Reduced EMI, SZZA009 de Texas Instruments.
- Printed-Circuit-Board Layout for Improved Electromagnetic Compatibility, SDYA011 de Texas Instruments.
- Designing Microcontroller systems for electrically noisy environments, AP125 de Intel.
- Designing for Electromagnetic Compatibility (EMC) with HCMOS Microcontrollers, AN1050 de Motorola.
- Power Supply Integrity, de Altera, accesible en <http://www.altera.com/support/devices/power/integrity/pow-integrity.html>, última visita en Marzo de 2009.

En esta sección vamos a comentar el documento 'Minimizing Ground Bounce & Vcc Sag', de Altera, accesible en http://www.altera.com/literature/wp/wp_grndbnce.pdf. Si no lo encuentras puedes ponerte en contacto con el coordinador del libro o la autora de este caso.

Actividad del alumno

- Descárgate el documento, e intenta entender todos los términos que aparecen.
- Haz una lista de las soluciones que propone Altera para minimizar el ruido de masa y de Vcc. Coméntalas brevemente.

Solución al caso y comentarios

El documento de Altera hace referencia al problema del ruido de masa y alimentación en la conmutación de salidas digitales. Debido al gran número de pines que los dispositivos programables pueden llegar a tener, este problema puede afectar su funcionamiento. Comentaremos los conceptos más relevantes que trata el documento de Altera.

El ruido de masa (*ground bounce*) se produce cuando una o más salidas digitales conmutan de 1 a 0. La carga capacitiva que tengamos a la salida del propio pin (puede ser debida a la pista, a la entrada de otro circuito) debe descargarse. La intensidad de descarga atraviesa la inductancia propia del piny del dispositivo (y del trazado de la pista), provocando un cambio de voltaje, $V=L di/dt$, que afecta a la masa del dispositivo con respecto a la masa de la tarjeta.

El efecto se acentúa cuando hay varios pines que cambian de forma simultánea (*simultaneous switching outputs, SSO*). Este efecto se puede observar con un osciloscopio, midiendo un pin de salida en bajo con respecto a la tierra de la tarjeta, mientras otros pines cambian su valor (un ruido similar puede observarse en una de las figuras del caso ‘Ruido en una señal de reset en un cableado’, en este mismo libro).

El ruido de alimentación (Vcc Sag) es similar, pero afecta a la alimentación interna del dispositivo cuando hay transiciones de 0 a 1 en las salidas.

Altera propone una serie de métodos para minimizar el ruido de masa y de alimentación. Los vamos a comentar brevemente.

- Utilización de encapsulados *Flip Chip*: Se trata de dispositivos en cuya fabricación se coloca una bola de material de soldadura en cada pad. Después, el chip es girado, de forma que queda boca abajo para su posterior soldadura al sustrato. Estos encapsulados presentan varias ventajas. En lo que aquí nos concierne, los pads están distribuidos por toda su área y no solo en los lados. Por tanto, su inductancia de los pads es menor, por lo que es conveniente para reducir el ruido comentado. En la comparación entre dos tipos de encapsulados para FPGAs, uno con conexión tradicional por hilos entre el pad y el pin (wire bonding) y otro de tipo *Flip Chip*, el segundo presenta una reducción del 72% en el ruido de masa y del 58 % en el de alimentación.
- Reducir el *Slew Rate*: Dado que el ruido depende de la derivada temporal, si las transiciones son más lentas reduciremos el valor del voltaje producido. Los dispositivos programables suelen tener sistemas para hacer más lentos los cambios en las salidas digitales. Esto se suele controlar desde las opciones del software de compilación y síntesis (MaxPlusII o Quartus II en el caso de Altera). Por ello, es un método simple de reducir el ruido. En las experiencias de Altera, activar las opciones de *slow slew rate* permitió mejorar en un 65% y un 61% el ruido de masa y alimentación respectivamente.

- Separar las salidas que conmutan de forma simultánea, SSO, evitando que se coloquen en pines adyacentes. Si hay más pines de I/O en el dispositivo que salidas en el diseño, se pueden conectar los pines sin usar a tierra o Vcc. Por ejemplo, una configuración Vcc-I/O-GND-I/O-Vcc- etc, es capaz de reducir el ruido de masa y de alimentación en un 45% y un 49% respectivamente.
- Utilizar Lazos de Seguimiento de Fase (Phase Locked Loop, PLL) para desfasar las SSO. En las FPGAs avanzadas, se puede usar PLLs para desplazar ligeramente las transiciones de reloj de una parte del dispositivo. De esta manera se reduce el número de SSO. Lo ideal es desplazar uno de cada dos pines de I/O. Con un desplazamiento de 341 ps, se consiguió una mejora del ruido de masa y de alimentación en un 12% y 24% respectivamente.
- Retrasar las salidas. Algunas FPGAs poseen mecanismos en las celdas de salida para retrasarlas. De este modo, podemos conseguir un efecto similar al de los PLLs. Los resultados experimentales de reducción del ruido son similares.
- Introducir resistencias en serie en las salidas. Se recomienda usar valores pequeños (10 a 33 Ω). Si el retraso que introducen es aceptable, es una medida sencilla. Puede reducir el ruido de masa y alimentación en 46 y 12% respectivamente. Si además se conecta un pin de cada tres a Vcc o GND, se consigue reducir el ruido de alimentación hasta un 49%.
- Usar terminaciones RC en paralelo. R debe ser igual a la impedancia de pista, típicamente de 50 Ω , mientras que C debe ser mayor que 100 pF. El ruido de masa y alimentación se mejora en un 47 y 31% respectivamente.

Si observamos en conjunto todas las medidas que se pueden tomar y sus resultados, podemos destacar dos que son muy sencillas y que ni siquiera necesitan cambiar la placa de circuito impreso. Por un lado, el control del *slew rate* es algo habitual en todas las CPLDs y FPGAs. Los propios entornos de trabajo (como MaxPlusII de Altera) permitirán hacer más lento el *slew rate*, simplemente activando alguna opción en la compilación. Por otro lado, usar los pines de I/O no conectados para unirlos a GND o VCC tampoco supone casi cambios (especialmente si disponemos de plano de alimentación y de masa). Aunque no obtengamos la configuración óptima de distribución de pines, siempre ayudará a reducir el ruido.

Tampoco debemos olvidar las reglas generales de diseño de circuitos impresos que pueden tener influencia en el ruido de la alimentación. Un desacoplamiento adecuado mediante condensadores es una de ellas. Al respecto, el lector puede buscar también en la web de Altera el término *Power Supply Integrity*. Además, la transmisión de señales diferencial, como el Low Voltage Differential Signal (LVDS), es más inmune a los efectos de ruido de masa, puesto que dicho ruido afecta por igual a las señales positivas y negativas, manteniendo su diferencia constante.

14

Ruido en una señal de reset de una placa de circuito impreso

Inmaculada Plaza García

Descripción

Un entrenador de braille para niños con discapacidad visual contiene dos placas. En la placa frontal se encuentran pulsadores para introducir el código Braille, una ruleta selectora del modo de operación y un pulsador de reset. En la placa principal un microcontrolador recibe las señales de la placa frontal y actúa en consecuencia. La alimentación entra desde un adaptador de corriente alterna a la placa principal, donde se convierte a 5 v, y éstos son pasados a la placa frontal también a través del mismo cable que lleva las señales de los pulsadores de la placa frontal. En la placa frontal no hay ningún circuito digital, sólo pulsadores.

Se observa que, en un determinado modo de operación, tras la introducción de unas pocas letras y al accionar uno de los pulsadores, el sistema se resetea y vuelve al estado inicial, comenzando la secuencia. Con el osciloscopio, se observa un ruido en la señal de reset.

Como hemos mencionado, la parte electrónica consta de dos placas. Una frontal, recibe los pulsadores, tanto para las letras como para el reset, y el selector. Otra contiene el microcontrolador y el circuito de sonido. Ambas placas se comunican por un cable plano. En las figuras 1 a 4 podemos ver las diversas capas (existe un plano de masa en ambas placas, pero no se muestra para facilitar la visualización).

Se intentó arreglar el problema del ruido colocando un filtro RC en la pista del reset de la placa frontal. Aunque se mejoró algo, no consiguió eliminar totalmente el problema, además de los problemas asociados a la “chapuza” de tener que cortar la pista para poner el filtro RC. Así el prototipo se quedó sin reset, y éste problema sólo se solucionó en la siguiente versión. El reset fue simulado con el encendido y apagado general del dispositivo.

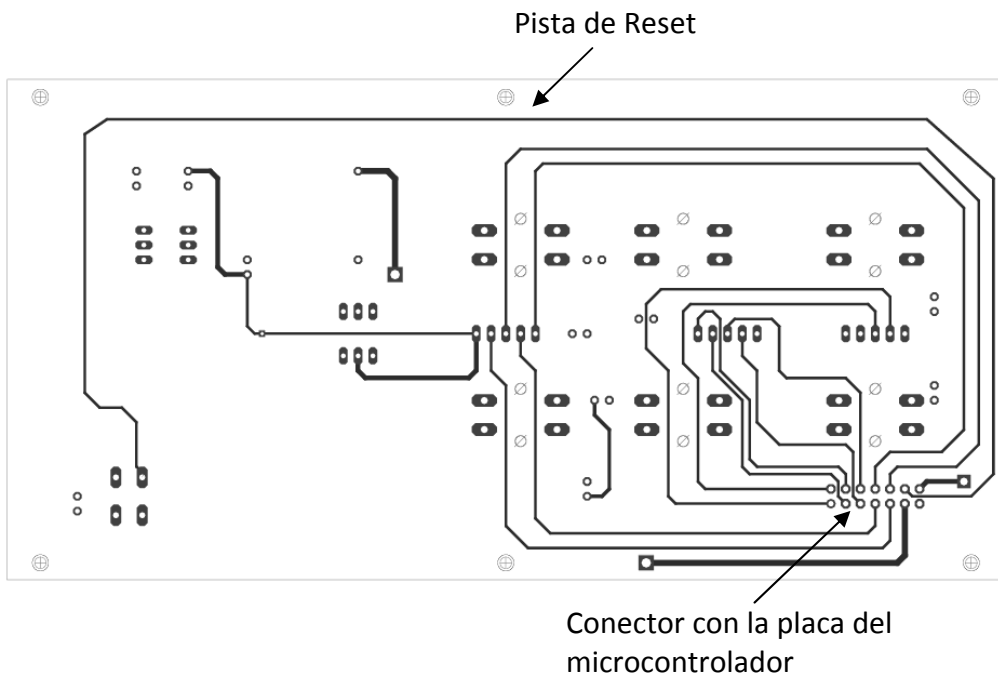


Figura 1. Placa frontal: Top

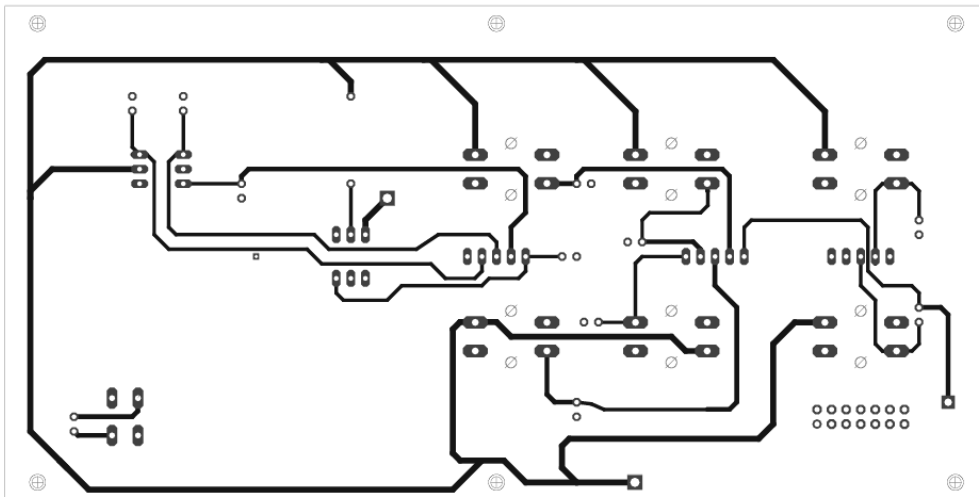
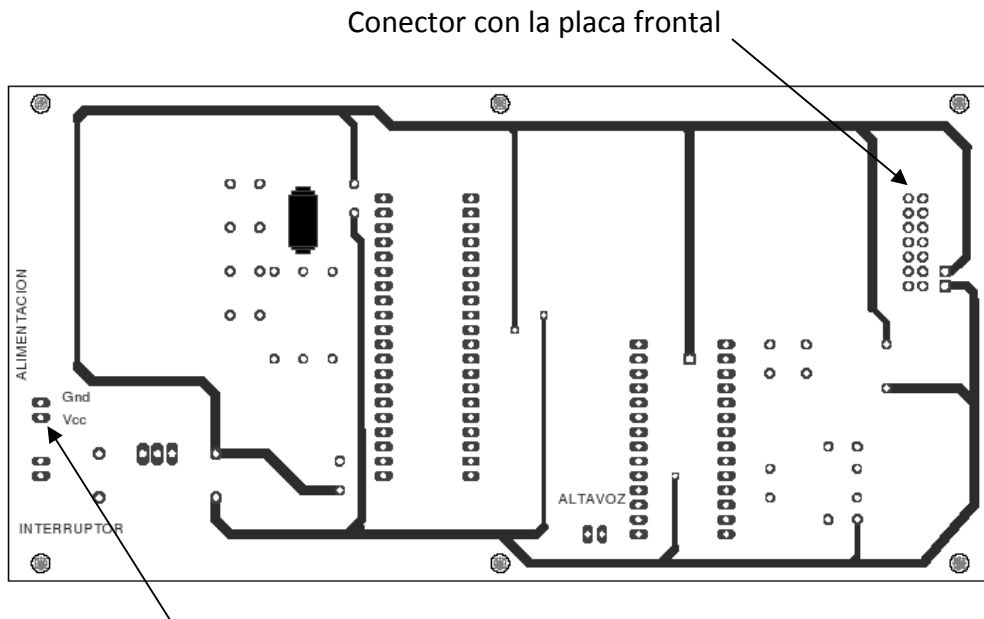


Figura 2. Placa frontal: Bottom



Zona de entrada de la alimentación

Figura 3. Placa del microcontrolador: Top

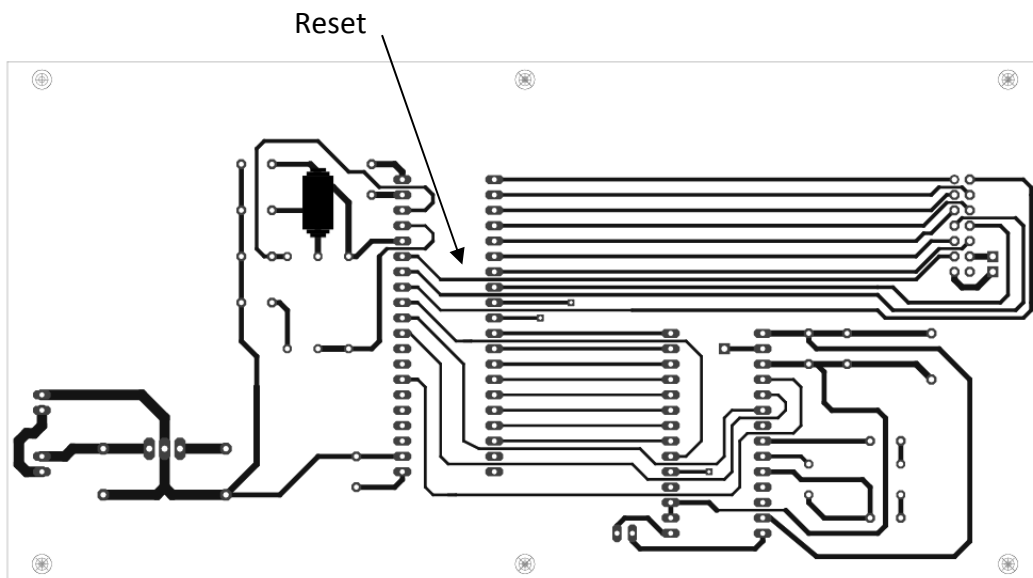


Figura 4. Placa del microcontrolador: Bottom

Actividad

Responde a las siguientes preguntas:

- ¿Qué aspectos del diseño del circuito impreso crees que influyen en el ruido del reset?
- ¿Cómo se podría mejorar el diseño?

Solución del caso y comentarios

A la hora de diseñar una placa de circuito impreso es importante hacer las pistas lo más cortas y anchas posibles. Esto cobra especial relevancia al hablar de ciertas pistas muy sensibles al ruido, o de ciertas pistas que son generadoras de ruido. Por su importancia, el reset es una pista sensible en la que se debe tener mucho cuidado. En el diseño del prototipo la pista tiene una gran longitud. Esto debería ser evitado. En este caso, la experiencia demostró que, a pesar de la existencia de plano de masa, se introducía un ruido en dicha línea.

Otro aspecto relevante es que la placa del microcontrolador recibe como entradas los pulsadores y el reset a partir de un cable plano. La entrada del cable está justo en el otro lado de la alimentación de la placa. El ruido que venga por el cable atraviesa toda la placa del microcontrolador. Este aspecto también es claramente mejorable. En la placa principal debería hacerse un esquema de masas separadas, donde la masa de las E/S en la placa del microcontrolador estuviese separada de la masa del resto del circuito, y unidas por un solo punto cerca de la alimentación. Las entradas pueden estar optoacopladas, o al menos filtradas para evitar ruido. En el caso de que pasen señales eléctricas de la parte de E/S a la parte del microcontrolador, deberían tener una masa cerca, por ejemplo agrupándolas de forma que tuviesen una pista ancha de masa por debajo que sirva de unión a los dos planos de masa. En la figura 5 se representa esquemáticamente la idea de la separación de masas.

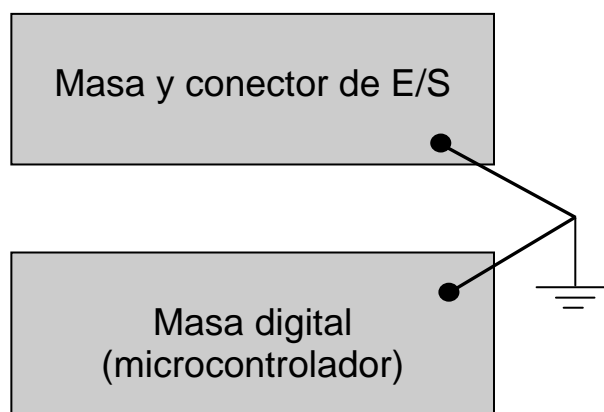


Figura 5. Esquema de la separación de masas

Finalmente, cabe comentar que se puede mejorar la entrada a través de los pulsadores en la placa frontal, además del circuito RC presente en la placa, para evitar que entre ruido por ellas. Se puede colocar un elemento (diodos en antiparalelo, zener) que evita algunos picos de voltaje observados.

Observando todas estas medidas, la nueva versión del circuito no presentó problemas en el reset. En este caso, lo más relevante era incluir el reset directamente en la placa del microcontrolador.

© 2010 Inmaculada Plaza García

Ruido en una señal de reset en una protoboard

Inmaculada Plaza García

Descripción

Un sistema digital basado en un dispositivo programable debía conectarse a un bus (bus ISA) de un PC. El bus contiene las típicas líneas de dirección, datos, y de indicación de ciclo de lectura y escritura. El bus incluye una señal de reset. El sistema digital implementado en el dispositivo programable tiene un registro interno que corresponde a una dirección del bus. En un determinado momento de la verificación del diseño previo, no se tenía acceso a los conectores necesarios para conectar las dos placas de desarrollo (la de dispositivos programables y la de desarrollo de prototipos con el BUS ISA), por lo que se decidió usar cable rígido, como aparece en la figura 1.



Figura 1. Conexión placa de desarrollo del bus ISA – placa de desarrollo de PLDs

Sin embargo, el resultado es que el registro interno estaba siempre en 0, independientemente del valor escrito en el bus de datos. Se pudo comprobar que existía un ruido en el reset, que hacía que el registro se quedase en valor 0. En la figura 2 se observa el ruido de la señal de reset en el osciloscopio. Obsérvese que la escala es de 2 V, por lo que el ruido supera ampliamente el voltio, y es suficiente para ser entendido como un valor lógico alto.

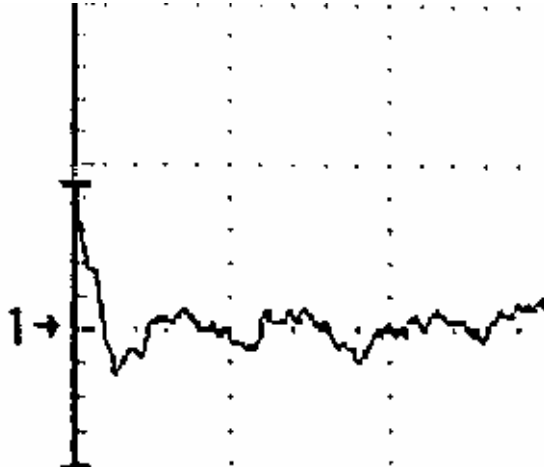


Figura 2. Imagen del osciloscopio con un ruido en la señal de reset

Actividad

Responde a las siguientes preguntas:

- ¿Puedes hacer algún comentario sobre el cableado?
- ¿Qué recomendaciones darías a la persona que está desarrollando el prototipo?

Solución del caso y comentarios

El principal comentario que se puede hacer es que con ese cableado ¡lo raro es que no se introdujese ruido! Evidentemente los bucles de señal son tan grandes que tanto la emisión como la sensibilidad son muy altas. No obstante, hay que decir que en este caso la interferencia en la señal se solucionó rodeando la señal de reset con un cable de masa. Esto se muestra en la figura 3:

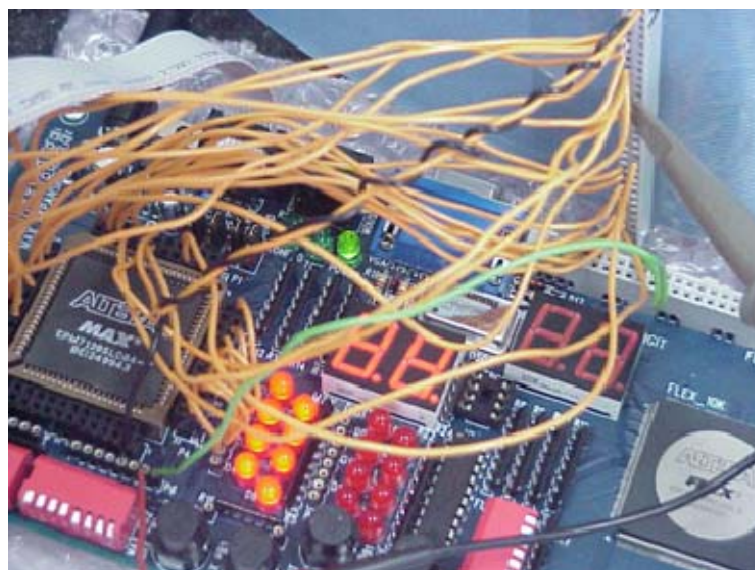


Figura 3. Conexión placa de desarrollo del bus ISA – placa de desarrollo de PLDs, incluyendo un cable de tierra alrededor de la señal de reset

Aunque evidentemente la solución pasa por conectar adecuadamente las dos placas de desarrollo, este es un ejemplo sencillo e ilustrativo de que la reducción de los bucles mejora los problemas de interferencias electromagnéticas.

© 2010 Inmaculada Plaza García

Los cables de entrada y salida de un sistema digital de control como eficientes antenas receptoras de ruido en un ambiente industrial

Tomás Pollán Santamaría

Descripción

Nuestro grupo departamental había diseñado un sistema electrónico, basado en microprocesador, para controlar la velocidad de los motores de grandes máquinas de estirado de hilo en una fábrica de bobinas industriales de hilo de nylon. Este proceso de estirado es de suma importancia pues determina las características mecánicas específicas del hilo, a través de la configuración espacial de las macromoléculas que lo conforman.

En este diseño el microprocesador debe generar las referencias de velocidad adecuadas para las etapas de potencia que controlan el giro de los motores, junto con algunas señales adicionales de control de puesta en marcha y parada, y debe recibir las señales de los tacómetros de los motores que, a través del contaje del número de vueltas, permiten medir su velocidad de giro. Todas estas señales son en forma de pulsos, algunos directamente sobre la tensión de red (triacs), y la transferencia de señales (control-máquina) requiere cables de una cierta longitud, dada la situación y configuración de las máquinas y etapas de potencia respecto del sistema de control.

Desde un primer momento fuimos conscientes de la gran importancia del aspecto de seguridad de funcionamiento, ya que la interrupción de un proceso de hilada (de fabricación de un amplio conjunto de grandes bobinas de hilo en una misma máquina) daba lugar a desechar todo el material empleado en el proceso, con la consiguiente repercusión económica, pérdida de tiempo y disminución de volumen de fabricación. Las bobinas de hilo incompletas no son aprovechables, ya que los fabricantes de tejidos de nylon no las admiten, ni tampoco son reutilizables en un nuevo proceso de fabricación.

Por ello, antes de arrancar una “hilada” el microprocesador ha de comprobar, por programa, los diversos componentes digitales del sistema, su posicionamiento en el mapa de memoria y su correcta actuación. En tal sentido, se verifica que la memoria RAM es accesible en el lugar previsto, pudiendo escribir y leer en todas sus posiciones y, en forma análoga, se comprueba los periféricos de entrada y de salida (de tipo PIA, peripheral interface adapter, en su mayoría); también se comprueba, mediante un protocolo con fuerte redundancia, la información leída de una memoria EPROM que especifica los datos particulares de una “hilada” concreta. Asimismo, el microprocesador verifica, en lo posible, sus propios registros y recursos internos y dispone de un circuito de “watch dog” que vigila cíclicamente su propio

comportamiento. Si las comprobaciones previas indicadas no aseguran que todos y cada uno de los bloques funcionales digitales se encuentran en posición y funcionamiento correcto, el sistema no inicia un proceso de “hilada”.

Por otra parte, se había elaborado un programa del microprocesador fuertemente estructurado en forma cíclica, lo cual facilita la supervisión que efectúa el “watch dog” y la recuperación del control si, por cualquier circunstancia, se produce un error en la sucesión de instrucciones (siempre, claro está, que ese error no provoque un salto fuera de los propios ciclos del programa).

También fuimos conscientes de que la situación en que debía funcionar el sistema correspondía a una planta industrial de fabricación, con presencia de alto nivel de ruido electromagnético, tanto en forma de ondas como a través de la red de tensión eléctrica. Los componentes magnéticos de los motores, en particular sus bobinas, y las escobillas de los mismos (en su rápida conmutación mecánica) “lanzan” al entorno fuertes interferencias en forma de campos electromagnéticos; su control “troceado” mediante tiristores que conmutan grandes intensidades (del orden de los 50 Amperios) aumenta tales interferencias ambientales e introduce perturbaciones en la red de tensión alterna que alimenta todos los equipos, incluyendo nuestro sistema electrónico de control.

Por ello, se había diseñado el circuito electrónico con adecuado blindaje, mediante una buena carcasa ferromagnética (con la parte exterior conductora), con filtrado eficiente de la toma de tensión de red, con condensadores de desacoplo muy próximos a cada uno de los circuitos integrados y con acoplo optoelectrónico de las entradas y salidas digitales.

Una vez montado el prototipo se sometió a sencillas pruebas de interferencias en nuestro propio laboratorio; como hacemos habitualmente, simulamos la incidencia de interferencias ambientales mediante pulsos de activación de un potente taladro, situándolo muy próximo a la carcasa del circuito, y provocamos perturbaciones en la red mediante conexión/desconexión sobre la misma de un transformador grande. En ningún caso observamos problemas de funcionamiento del sistema de control.

No fue así al llevar el prototipo a planta y probarlo dentro del proceso de fabricación: su funcionamiento correcto no se mantenía más allá de unos pocos minutos, a partir de los cuales daba señales de haber perdido la secuencia normal del programa y el proceso de “hilada” se detenía o bien pasaba a ser erróneo.

Era razonable suponer que las perturbaciones que estropeaban el funcionamiento del circuito accedían al mismo (“se colaban” dentro de la carcasa) a través de los largos cables de entradas y salidas digitales que lo conectaban con la máquina, relativamente distante. Por fuerza tales cables han de entrar físicamente en la carcasa y tener un pequeño recorrido en el interior de la misma; a pesar de su acoplo optoelectrónico, su actuación como antenas receptoras de interferencias (efecto al que se suma los correspondientes bucles de tierra que pueden conformar) podía hacer presente dentro de la carcasa una parte de las interferencias electromagnéticas que se encontraban fuera. Asimismo, pensamos que la conmutación, en el interior de la carcasa, de

algunos triacs que generaban pulsos de salida, podía sumar un efecto perturbativo a las interferencias que sus cables aportaban.

Actividad del alumno

- ¿Qué es un optoacoplador? ¿Cuáles son sus parámetros más relevantes? Indica cómo pueden usarse para evitar problemas de interferencias electromagnéticas.
- Las E/S de una placa de circuito impreso son uno de los puntos por lo que puede entrar ruido en un sistema electrónico. Indica algunas medidas que se puedan tomar para reducir ese ruido.
- A pesar de optoacoplar las E/S, en el caso descrito todavía se presenta un problema de interferencias electromagnéticas. ¿Se te ocurre alguna manera de mejorar aún más el aislamiento?

Solución del caso y comentario

Dado que en este sistema el factor de mayor importancia es el referido a la seguridad funcional, siendo el coste económico un aspecto secundario, se nos ocurrió evitar por completo que los cables de entradas y salidas digitales llegasen a entrar directamente en la carcasa del circuito, añadiendo, para ello, un segundo acoplo optoelectrónico de separación, en unas pequeñas carcasas adicionales; de hecho, se añadieron dos carcasas pequeñas, “pegadas” a una de las paredes de la carcasa propia del sistema: una para las señales de entrada y otra para las de salida.

Las señales de entrada (los cables “externos” que las comunican desde la máquina) llegan a una carcasa específica de entrada, en la que pasan por un primer acoplo optoelectrónico, tras el cual pasan a la carcasa general en la que sufren una segunda separación optoelectrónica. De manera que los cables exteriores no tienen el más mínimo recorrido dentro de la carcasa del circuito de control, sino que, antes, se han separado galvánicamente (ver figura 1). Para lograr una separación completa (entre el diodo y el transistor del acoplador) la tensión de alimentación del primer acoplador optoelectrónico es aportada por una fuente de alimentación propia, conformada dentro de la carcasa de entradas y sin conexión con la fuente de alimentación general del circuito de control.

De igual forma, las señales de salida tienen su primer acoplo optoelectrónico en la placa circuital del sistema de control, tras el cual salen a una segunda carcasa específica de salida, en la que pasan por un segundo acoplo. La tensión de este segundo acoplador es dada por una tercera fuente de alimentación situada en la carcasa de salidas (ver figura 1). Aquellas salidas que comunican pulsos de tensión de red lo hacen a través de triacs, cuya conmutación se hace coincidir con el cruce por cero de la onda de red: conmutación suave.

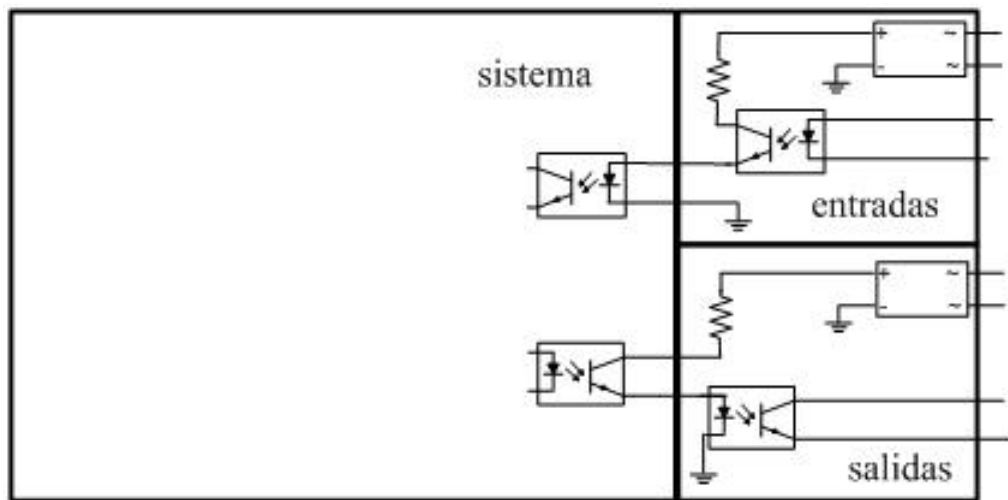


Figura 1. Esquema de la solución finalmente adoptada

La doble separación galvánica de entradas y salidas, con doble blindaje mediante carcavas separadas de la general del circuito distancia en gran medida a los cables externos, fuentes de recepción de interferencias, del circuito digital de control; tales cables se encuentran "fuera" y la información se transmite ópticamente, con separación eléctrica. En la práctica, la solución descrita se ha demostrado efectiva ya que desde su implantación no se han detectado problemas de comportamiento de estos sistemas de control, de los cuales se han fabricado y puesto en funcionamiento más de una decena para un número análogo de máquinas de estirado de hilo en una misma sala de fabricación de nylon.

17

Máquina expendedora de latas: problema derivado de interferencias por red desde enchufes cercanos

Tomás Pollán Santamaría

Descripción - resumen

Estudio del problema reduciendo el circuito al mínimo y apantallándolo. Comprobación de que seguía existiendo problemas probablemente debido al acoplo capacitivo a través de la carcasa (dado que se resolvió el mal funcionamiento cuando la carcasa se conectó a "masa" a través de un condensador).

© 2009 Tomás Pollán Santamaría

18

Experiencia de medida de EMC en el desarrollo de la primera encimera de cocina de inducción

Tomás Pollán Santamaría

Descripción - resumen

Se acudió en varias ocasiones a medir al laboratorio de medidas electromagnéticas en Madrid. Hubo que improvisar una jaula de Faraday con papel albal y, en cambio, se observó que, en contra de los pronósticos, el mayor problema no eran las interferencias radiadas sino las interferencias a través de red.

© 2009 Tomás Pollán Santamaría