

Construção de magnetômetro, de precessão nuclear de prótons, para observatórios magnéticos

André Wiermann, Luiz C. C. Benyosef OBSERVATÓRIO NACIONAL, Brazil

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represent any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper presents a development work to build a proton precession magnetometer in the LDSM/ON to be used in the Brazilian magnetic observatories. Technical updates are being introduced in the sensor and in the associated electronics.

Introdução

O Magnetômetro de Precessão Nuclear de Prótons, também denominado de magnetômetro de prótons, ou ainda PPM, junto com o magnetômetro fluxgate é de fundamental importância nos trabalhos de rotina diária dos observatórios magnéticos. Tem ainda aplicações diversas em geomagnetismo da terra sólida e em missões espaciais. Seu princípio de funcionamento, conhecido há bastante tempo, admite diferentes formas de tratamento para o sinal do sensor PPM, e para a medição da frequência de Larmor.

No protótipo que está sendo desenvolvido, são introduzidas atualizações tecnológicas no sensor e no circuito eletrônico associado. O objetivo deste projeto é conseguir um equipamento que apresente resolução mínima de 1 nT (um nanoTesla), compatível com os equipamentos comerciais em uso e de operação nos observatórios magnéticos brasileiros.

Este trabalho é também parte de um esforço para preparar o LDSM/ON - Laboratório de Desenvolvimento de Sensores Magnéticos do Observatório Nacional (ON) - para desenvolver outros tipos de magnetômetros utilizando tecnologia de ponta e de interesse dos observatórios magnéticos brasileiros.

O princípio de operação do PPM baseia-se na aplicação de determinadas propriedades magnéticas do núcleo do átomo de hidrogênio, i.e. do próton. Atuando como dipolos magnéticos, os prótons, interagem com o campo magnético ambiente, produzindo um movimento de precessão cuja frequência depende diretamente da intensidade do campo magnético. As medições realizadas por este tipo de magnetômetro são denominadas de absolutas, pelo fato de que sua calibração depende de uma constante física fundamental, a razão giromagnética do próton.

A medição é conseguida através da detecção da frequência de precessão induzida sobre uma bobina e produzida após a polarização de amostras de líquidos hydrogenados, como a água ou hidro-carbonetos.

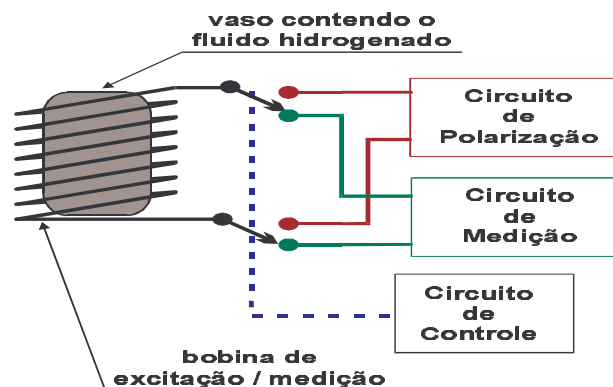


Diagrama simplificado do magnetômetro de precessão

A frequência característica produzida neste fenômeno é conhecida como Frequência de Precessão de Larmor e obedece à seguinte relação:

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

sendo ω , a frequência em rad/s, γ a constante giromagnética do próton e B_0 o fluxo magnético.

O sinal produzido pelo PPM é de natureza cíclica, com decaimento exponencial e com duração de poucos segundos. Este sinal está presente apenas durante o tempo de relaxação transversal do líquido magneticamente polarizado no sensor. Nas regiões próximas aos trópicos, onde a intensidade do campo magnético terrestre é baixa, em especial na região sul e sudeste do Brasil, o sinal produzido pelo sensor PPM apresenta baixos valores na relação sinal/ruído, além de curta duração. Estas características dificultam o processamento do sinal produzido pelo sensor.

Visando extrair o máximo de informações do elemento sensor, efetuamos estudos para conhecê-los e assim procurar otimizá-los. O mesmo foi feito considerando o circuito eletrônico de processamento associado. Neste último visamos otimizar a relação sinal/ruído, procurando meios para processar o sinal no menor tempo possível, dentro da janela de tempo que o sensor oferece.

Definição do Projeto

Por se tratar do projeto de um instrumento de grande precisão, uma atenção especial foi dada às características construtivas do sensor, em particular considerando a natureza do líquido hydrogenado que seria utilizado.

Pela literatura, diversos autores procuraram realizar trabalhos comparando o desempenho de substâncias, que teoricamente poderiam ser utilizadas como elemento sensor. A água, querosene e isopropanol são os principais exemplos. Estes estudos foram realizados analisando os diferentes tempos de relaxação. Entretanto, nem sempre são apresentados os valores exatos da frequência de Larmor para estas substâncias. Por este motivo, os magnetômetros apresentados nestes trabalhos são calibrados por meio de comparação com outros instrumentos, normalmente comerciais e nem sempre de maior precisão.

A natureza variável do campo magnético terrestre, bem como a perturbação local causada pela polarização da amostra no magnetômetro, impõe grande dificuldade de se efetuar a utilização simultânea e, conseqüentemente, a calibração por comparação entre instrumentos, especialmente se o modelo em teste produz medidas com resolução igual ou melhor que 1nT.

Comparando o resultado de sensores construídos com diferentes líquidos hidrogenados, percebe-se que duas substâncias comuns possuem as características adequadas para a construção do elemento sensor: a água e o querosene.

Propriedades da água e do querosene para uso no sensor PPM:

Substância	Amplitude Inicial (relativa)	T1 (s) 25 °C	T2 (s) 25 °C	Ponto de fusão °C
Querosene	1,00	~ 0,5	~ 0,4	-9,6
Água destilada	0,54	~ 2,1	~ 1,2	0,0
Água livre de oxigênio	0,63	~ 3,1	~ 1,4	0,0

A Associação Internacional para Magnetismo e Aeronomia (IAGA) recomenda como elemento sensor padrão, a água, cujo valor da razão giromagnética é bem estabelecido pelo grupo CODATA, do National Institute of Standards and Technology (NIST).

O valor da constante giromagnética recentemente publicado pelo NIST (2000) é:

$$\gamma'_p = 2.67515341 (11) \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$$

O uso da água como elemento sensor, permite a construção de instrumentos cuja calibração não depende da comparação com similares comerciais, e podem ser realizados utilizando apenas instrumentos comuns de bancada, tais como freqüencímetros e osciloscópios.

Devido a temperatura de congelamento da água, em torno de 0°C, seu uso torna-se inadequado para ser utilizada em regiões fora das tropicais. Entretanto, em nosso país, esta realidade não constitui problema, principalmente pelo fato dos instrumentos dos observatórios magnéticos normalmente operarem em abrigos subterrâneos.

A água antes de ser utilizada deve ser desmineralizada e desionizada. Este procedimento é necessário para reduzir o teor de impurezas e de íons que poderiam comprometer a intensidade e a duração do sinal de precessão.

A água também deve estar livre de oxigênio dissolvido, considerando que o oxigênio livre é fortemente paramagnético e bastante solúvel na água, interferindo na medição do campo.

Para a confecção do sensor, foi escolhido o PVC, por se tratar de material magneticamente inerte e de fácil aquisição e manipulação.

Três sensores de diferentes dimensões foram completamente preenchidos com água purificada e em seguida submersos em uma cuba ultrasônica. A energia injetada pelas vibrações ultra-sônicas tem a propriedade de expulsar os gases dissolvidos, incluindo o oxigênio.

Um dos sensores, por ter um maior volume (aproximadamente 300ml), foi ainda submetido ao vácuo, momentos antes de seu fechamento, para garantir a ausência de gases que poderiam ser reabsorvidos da atmosfera, durante seu fechamento.

Três tamanhos de sensores foram escolhidos segundo os seguintes modelos:

O experimento de Bloch et al. (1946), com aproximadamente 10ml;

Como o anterior, mas com um comprimento 30% e um volume interno 50% maiores, para testar um maior aproveitamento do campo polarizador;

O experimento de Mohr and Taylor (2000), sendo um sensor com proporções quadradas (75 x 75 mm), com o volume próximo ao teste do CODATA, com cerca de 300ml.



Foto dos sensores lacrados e sem as bobinas

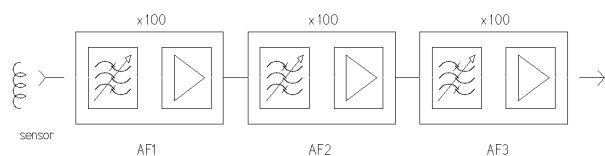
As bobinas foram calculadas e construídas com base na otimização da relação sinal/ruído, com dois tamanhos permitindo diferentes combinações de pares núcleo-bobina.

Tratamento do Sinal

Dois blocos principais do instrumento estão em estudo neste projeto: O circuito de aquisição do sinal e o processamento para a estimação da frequência de Larmor.

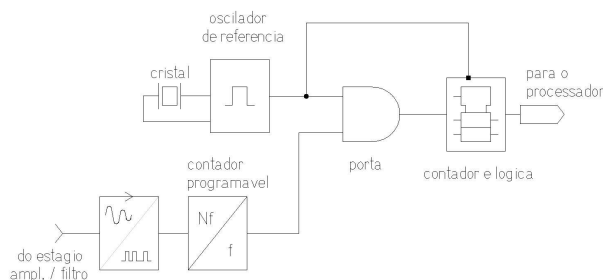
Para a aquisição do sinal, uma etapa amplificadora / filtro de três estágios foi desenvolvida, visando maximizar a relação sinal ruído, permitindo, em um trabalho posterior, o tratamento puramente digital do sinal.

Por se tratar de um sinal com amplitude da ordem de microVolts, o estágio amplificador tem um fator de ganho total da ordem de 10^6 . As três etapas são sintonizadas na frequência de interesse, de acordo com a faixa do campo a ser medido.



Estágio triplo amplificador / filtro variável

Após a amplificação e filtragem, o sinal estará pronto para o processamento. Inicialmente, será utilizada a técnica de contagem direta por razão de frequência, conforme o diagrama abaixo:



Procedimento para técnica de contagem direta do sinal

Em um trabalho futuro, este circuito será substituído por um conversor analógico/digital, com o objetivo de se empregar técnicas de processamento digital de sinais (DSP).

Para a montagem do projeto foi escolhido um sistema de desenvolvimento, na forma de kit, que inclui um microcontrolador para construção de sistemas e instrumentos industriais.

Este kit inclui uma placa processadora com memória, interfaces, canal de comunicação, display e teclado, além de uma plataforma de desenvolvimento, baseado na linguagem C.

A linguagem C é adequada para sistemas de medição em tempo real, devido a sua alta eficiência no código objeto gerado, e é por isso utilizado largamente em computação científica, em processadores industriais de uso geral e processadores DSP para sistemas de medição, automação e controle.

Esta técnica permite a determinação da frequência a partir de um oscilador de referência, cuja contagem de pulsos é determinada pelo processador, gerando a seguinte relação:

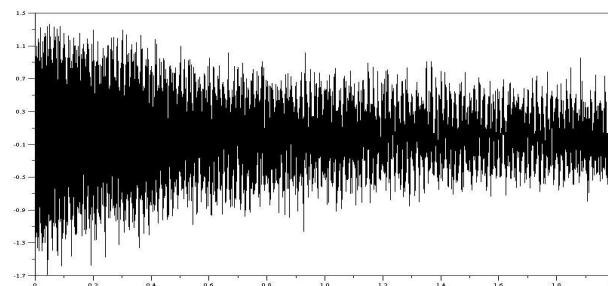
$$f_s = f_r \times N1/N2$$

Onde f_s é a frequência de Larmor a ser determinada, f_r a frequência de referência, $N1$ um número arbitrário de ciclos de f_s e $N2$ o valor obtido da contagem de f_r após $N1$ ciclos de f_s .

Por exemplo, para $f_s = 979$ Hz (23000 nT), $f_r = 10^7$ Hz e $N1 = 100$, tem-se $N2 \sim 1021450$, correspondendo a uma resolução teórica de $\sim 0,9$ mHz. Utilizando contadores de 32 bits, e médias após várias leituras, é possível se obter resoluções consistentes melhores que 4 mHz (0,1 nT).

As leituras obtidas pelo contador secundário ($N2$) serão processadas e escalonadas pelo microcontrolador para indicação e registro digital.

Com a finalidade de se determinar as características do circuito de filtragem e de testar algoritmos para o processamento de sinal, foram produzidas algumas rotinas para simular o sinal do sensor, incluindo o decaimento exponencial, ruídos aleatórios e indução da rede elétrica, bem como seus harmônicos.



$f_s = 979$ Hz, amplitude rms = 1 (normalizada) com ruído de rede elétrica de 60, 120 e 240Hz e ruído branco gaussiano (S/R = 30dB)

Resultados

O protótipo encontra-se em fase de acabamento – Maio 2003 – estando concluídos a fabricação das bobinas, núcleos e montagem do módulo processador concluídos.

O circuito de filtro e contagem da frequência está em fase de testes com resultados previstos para junho de 2003.

Conclusões

Este trabalho é objeto de dissertação de mestrado, cujo trabalho será apresentado em meados deste ano de 2003.

Agradecimentos

Ao suporte prestado pela FAPERJ, para o LDSM/ON.

Referências

- Alves, José G.** - Desenvolvimento de Um Magnetômetro a Precessão Nuclear - Dissertação de Mestrado - UFPA, 1983.
- Bloch, F.** - Nuclear Induction - Physics Review, 70, 460-474, 1946.
- Bloch, F., Hansen W.W. and Packard M.** - The Nuclear Induction Experiment - Physics Review, 70, 474-485, 1946.
- Cohen, E. R. and Taylor, B. N.** - The 1986 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants - J. Res. Natl. Bur. Stand. (US), 92, 85-95, 1987.
- Fowler, K.R.** - Electronic Instrument Design - Oxford University Press, 1996
- Horowitz, Paul and Hill, Winfield** - The Art of Electronics, Second Edition - Cambridge University Press, 1990.
- Jankowski, J. and Sucksdorf, C.** - Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice - NOAA / IAGA, 1996.
- Kay, S. M.**, Modern Spectral Estimation, Theory and Application - Prentice-Hall, 1987.
- Marple, S. Lawrence, Jr.**, Digital Spectral Analysis "with applications" - Prentice-Hall, 1987.
- Mateo Bertocco et al.** - Fast and Robust Estimation of Resonant Sensors Signal Frequency - IEEE Transactions on Instr. and Meas., Vol 51, April 2002.
- Mohr, P. J. and Taylor, B. N.** - CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998 - Reviews of Modern Physics, Vol. 72, No. 2, April 2000.
- Ness, N.F.** - Magnetometers for Space Research - NASA Goddard Space Flight Center, Report X-600-70-78, 1-151, March 1970.
- Oppenheim, Alan V. and Schafer, Ronald W.** - Discrete-Time Signal Processing - Prentice-Hall, Inc., 1989
- Primdahl, F.** - Instrumentos Geomagnéticos - Publicação Especial - ON, 1986.
- Schilling, D.L. and Belove, C.** - Electronics Circuits - McGraw-Hill, 1992
- Scilab Group** - Introduction to Scilab, Users Guide - INRIA, Unité de Recherche de Rocquencourt, 2002.
- Scilab Group** - Signal Processing with Scilab - INRIA, Unité de Recherche de Rocquencourt, 2002.