

# 小型アンテナによる磁気シールド内の RF ノイズ測定 — dc-SQUID センサに与える影響 —

Measurement of RF Noise in a Magnetic Shield with a Developed Monopole Antenna  
— Effect of RF Noise on FLL Operation of dc-SQUID Sensors —

田代晋久・笹田一郎・吉富邦明\*・風見邦夫\*\*

九州大学大学院総合理工学研究院, 福岡県春日市春日公園 6-1 (〒816-8580)

\*九州大学大学院システム情報科学研究院, 福岡県福岡市東区 6-10-1 (〒812-8581)

\*\*横河電機株式会社, 東京都武蔵野市中町 2-9-32 (〒180-8750)

K. Tashiro, I. Sasada, K. Yoshitomi\*, and K. Kazami\*\*

Department of Applied Science for Electronics and Materials, Kyushu University

\*Department of Computer Science and Communication Engineering, Kyushu University

\*\*Yokogawa Electric Corporation

We measured radio frequency electromagnetic noise in a cylindrical magnetic shield using a developed monopole antenna. RF noise entering the shield through its open ends affects the SQUID operation. In flux-locked mode, it causes the feedback circuit to unlock or increases the noise floor. First, we examined the effect of RF noise reduction using dc-SQUID first-order gradiometers and copper mesh shield. RF noise was also measured using a conical log spiral antenna and a developed monopole antenna. Second, we investigated the reduction of RF noise in a cylindrical magnetic shield by filling its open ends with metal-coated cloth using a fabricated antenna. The RF noise level was decreased inside the shield; as a result, the low-frequency signal-to-noise performance of the SQUID sensors were improved.

**Key words:** magnetic shield, SQUID sensor, RF noise, monopole antenna, metal-coated cloth

## 1. はじめに

SQUID センサは超高感度な磁気センサであり, 高性能な磁気シールドと組み合わせることで脳磁界のような非常に微弱で低周波の磁界を検出できる<sup>1)</sup>. 角形ヒステリシスループを持つアモルファス磁性薄帯で構成された多層構造の円筒形シールドに磁気シェイキングという手法を用いることで, 従来に無い軽量かつ高性能な磁気シールドが実現できることを提案してきた<sup>2)</sup>. しかし, 円筒形であるため開口端から侵入する RF ノイズは無視できない. RF ノイズは SQUID の  $\phi$ -V 特性に影響を与え, センサとしての性能を劣化する<sup>3)</sup>.

このことから, 円筒形磁気シールド内における RF ノイズの影響を把握しておくことは重要であり, 近年の携帯電話の普及に伴う数百 MHz 以上のノイズについても検討する必要がある. 本研究では研究室に存在する RF ノイズが SQUID センサへ与える効果を検討する. そのため現在開発中の誘発脳磁界計測用両端開口円筒形磁気シールドの内部に挿入できる手のひらサイズの小型アンテナを作成し, RF ノイズの測定に用いた. このアンテナと商用のアンテナの両方を用いて予備実験用に作成した銅メッシュによる電磁シールド内外での RF ノイズを測定し, 研究室環境下の RF ノイズ低減が SQUID センサへ

与える効果を調べた. また円筒形磁気シールドの開口端に導電性不織布(エミクロス)を詰めることによる内部の RF ノイズ低減効果を小型アンテナで確認し, この RF ノイズ環境の違いが SQUID センサへ与える効果を調べた. 本研究においてはこれらについて報告する.

## 2. RF ノイズ低減による SQUID センサへの影響

### 2.1 銅メッシュシールド内の RF ノイズ測定

RF ノイズ対策として, SQUID センサを収納するデューワールの周りを金属製の導体で覆うことが考えられるが, SQUID センサに2つの望ましくない影響を及ぼす<sup>4)</sup>. 1つは環境磁界の変動により誘起される渦電流による検出コイルへの寄与であり, 2つめは熱擾乱がもたらす変動電流による影響である<sup>5)</sup>. そこで, このような方法ではなく, Fig. 1 に示すような銅メッシュによる電磁シールドにより, 研究室内の RF ノイズを低減した空間を作成した. 線径 0.45 mm, 編み目サイズ 2 mm の銅メッシュを使用し, 脱着可能な2層構造となっている. 内部の電磁環境の目安は, 外層(1.8 × 1.8 × 1.8 m)のみで FM ラジオの受信が困難となり, 2層では携帯電話の使用が圏外となる程度である.

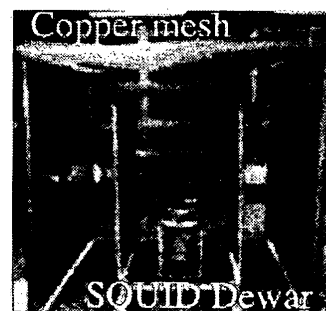


Fig. 1 Electromagnetically shielded enclosure with copper mesh in double-layer structure.

内部の RF ノイズの低減効果を調べるため, Fig. 2 に示すようなアンテナを作成した. これは N 型コネクタに直径 1 mm, 長さ 35 mm の錫メッキ線をアンテナ部, 91 × 91 × 1 mm の銅板をグランドプレーンとして取り付けした小型モノポールアンテナを作成し, アンテナ部に 50 × 50 × 2 mm のアルミ板を取り付け広帯域化をはかったもので

ある。スペクトラムアナライザ (Agilent Technology, E4402B) を用いて 300 MHz から 2 GHz (1 GHz 以上は参考まで) についての RF ノイズを 100 回平均で測定した。市販のコニカル・ログ・スパイラルアンテナ (Agilent Technology, 11966F, 測定対象周波数 200 MHz~1 GHz) による測定結果との比較を Fig. 3 に示す。両方のアンテナにおいて電磁シールド内部では RF ノイズが観測できない程度まで減衰された結果となり、この周波数帯域では少なくとも 20 dB 以上の低減効果があったと考えられる。

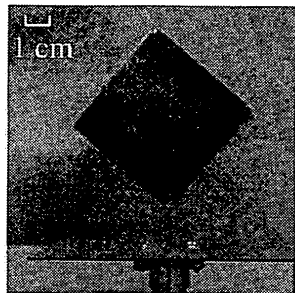


Fig. 2 Developed monopole antenna.

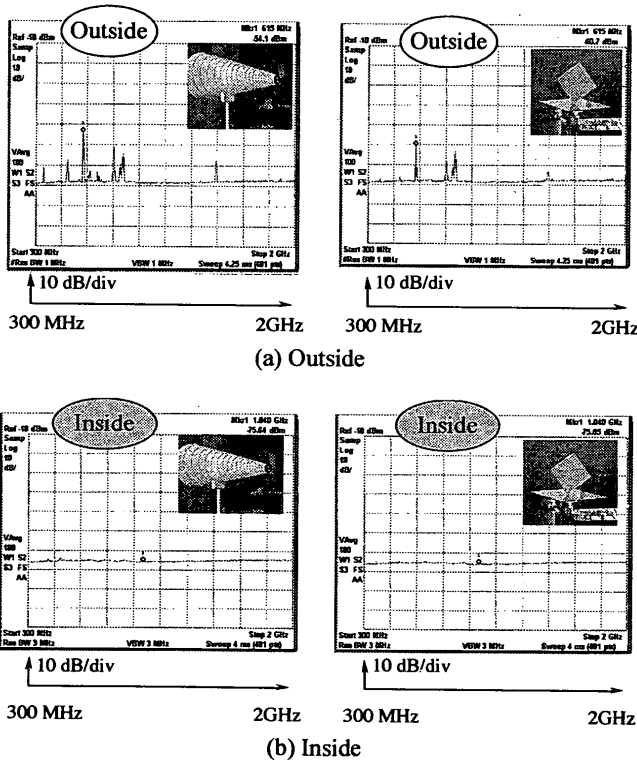


Fig. 3 RF noise spectrums between 300 MHz and 2 GHz measured (a) inside and (b) outside the copper mesh shield, using a conical log spiral antenna and a developed monopole antenna.

2.2 SQUID センサに与える効果

Fig. 4 に今回使用した横河電機社製の SQUID センサシステム (微小磁場計測システム PQ1016R-N1) を示す。ピックアップコイルにベースライン 50 mm の一次微分構造グラディオメータを使用した。デュワールの底部は球冠状で内部には 19 本のセンサを設置できる。今回は床に対して ch 0 を鉛直下向き方向, ch 1, 2 を斜め下向き方向, ch 3 を水平方向 (デュワールのインサートに固定) の計 4 本のセンサを使用した。直結型 FLL を用いているためセ

ンサ動作の指標となる  $\phi-V$  特性がクリアに観測できる。簡易パーマロイシールドの中に SQUID デュワーを入れ、電磁シールド内外で ch 1 についての  $\phi-V$  特性を比較した結果を Fig. 5 に示す。当研究室の RF ノイズ環境では劣化していた  $\phi-V$  特性が、電磁シールドによる RF ノイズ低減により、変調深さ  $\Delta V$  が回復するためロックが飛びにくくなり、大きな  $dV/d\phi$  が得られた。ch 1 について FFT Analyzer (Stanford Research Systems, SR780) を用いてアベレージング回数 16 回により評価を行った結果を Fig. 6 に示す。RF ノイズの低減により SQUID センサのノイズフロアを改善した。

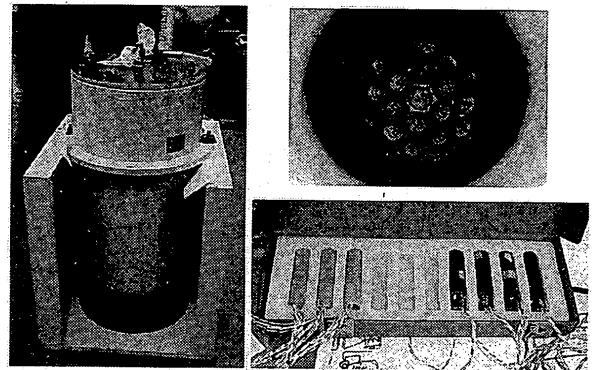


Fig. 4 SQUID sensor system.

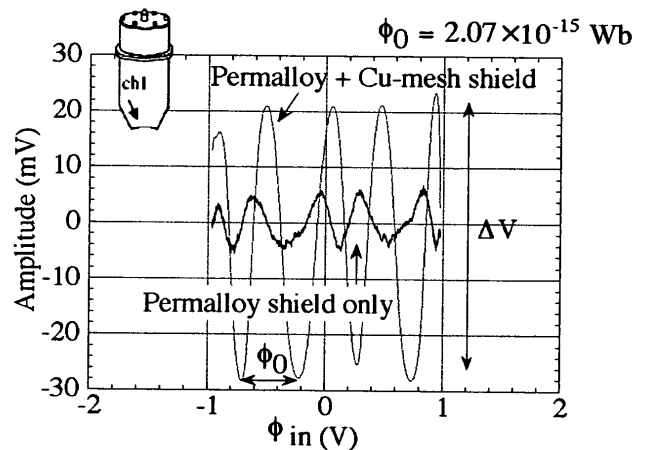


Fig. 5  $\phi-V$  curve of a SQUID sensor.

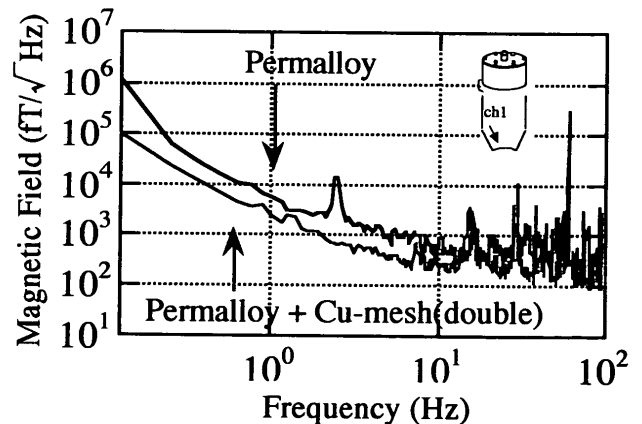


Fig. 6 Amplitude spectrum of magnetic noise inside and outside the copper mesh shield with a permalloy shield.

### 3. エミクロスによる磁気シールド内の RF 対策

#### 3.1 エミクロスによる RF ノイズ対策

次に誘発脳磁界計測用に開発中の両端開口円筒形磁気シールド(Fig. 7)でのRFノイズ対策とその効果を調べた。今回使用したのは三菱マテリアル社製の電磁不織布(エミクロス)を上下開口端につめることで開口端から侵入するRFノイズの低減を試みた。Fig. 8に磁気シールド内での小型アンテナによるRFノイズの測定結果を示す。Fig. 3(a)で示した研究室環境下におけるRFノイズに比べエミクロスをつめない場合においてもRFノイズは減衰しているが、まだ観測できるレベルであった。しかしエミクロスを詰めることで、銅メッシュによる電磁シールド内と同様に観測できない程度にまでRFノイズが減衰した。

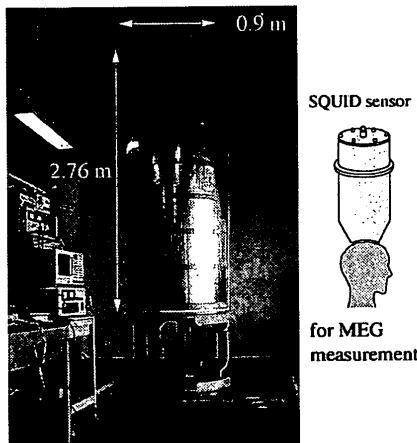


Fig. 7 Cylindrical magnetic shielding system.

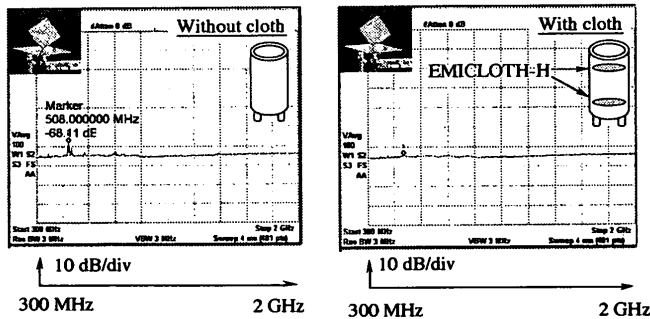


Fig. 8 RF noise spectrums between 300 MHz and 2 GHz measured in our cylindrical magnetic shield without and with metal coated cloth at the open ends using a developed monopole antenna.

#### 3.2 SQUID センサに与える効果

このRFノイズ低減によるSQUIDセンサへの効果を調べた。残留磁界の評価にはFFT Analyzerによるアベレージング回数16回による評価を行った。今回はRFノイズによる影響のみを明確に見るため、磁気シェイキングを行わなかった。Fig. 9にその結果を示す。シールドの軸方向を向いたch 0のセンサはこのRFノイズ対策により磁束ロック動作が可能となった。斜め向きのch 1のセンサはこれまでも磁束ロック動作が可能であったが、RFノイズ対策により、数Hz付近にあるラインスペクトルノイズ(1)が同じレベルにもかかわらず、ノイズフロアが約  $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 10 Hz から  $40 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 10 Hz という明らかな改善がなされた。シールドの径方向を向いたch 3

のセンサにはノイズフロアに変化が無かった。RFノイズは開口端から侵入してくるものが支配的であり、このセンサにとってはエミクロスによるRF対策をする以前からRFノイズは影響のない程度であると考えられ、対策前後で  $40 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  @ 10 Hz というノイズフロアからそれはうかがえる。

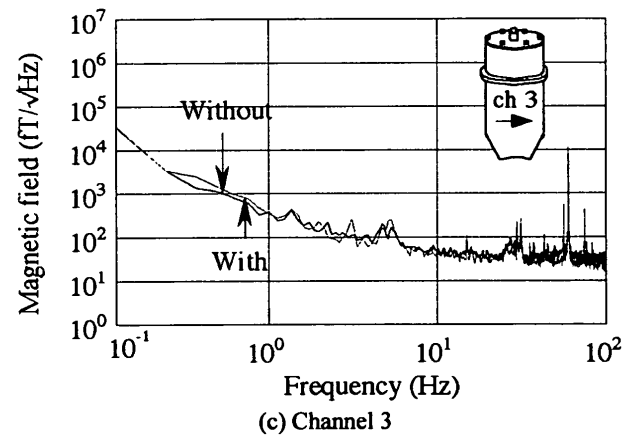
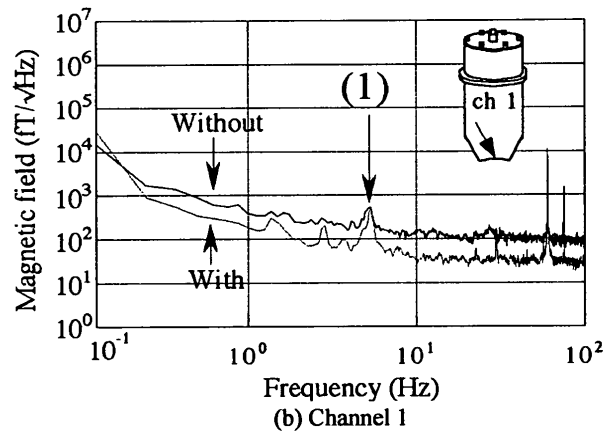
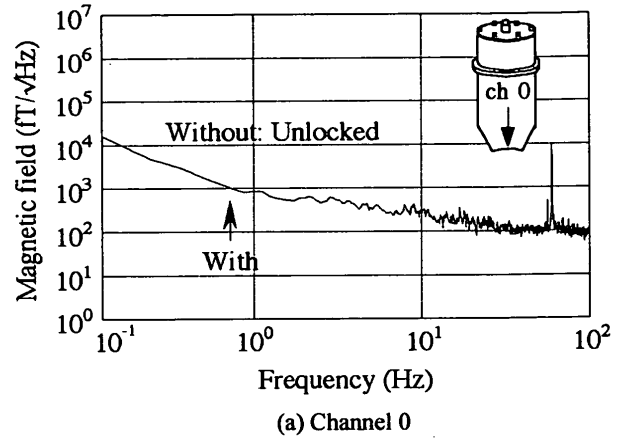


Fig. 9 Amplitude spectrums of internal magnetic noise around the center of our cylindrical magnetic shield with and without metal-coated cloth at the open ends.

### 4. 考察

Fig. 10に今回使用した直結型FLLによるSQUIDセンサシステムの回路概略図を示す。ピックアップコイルからSQUIDセンサに伝達された磁束が電圧に変換され、次段

のフィードバック回路を経て磁束の変化を電圧として取り出すことができる。直結型 FLL を使用しているため、Fig. 11 のような電圧のブロック図に置き換えることができる。ここで  $\phi_{in}$  は SQUID に鎖交する入力磁束、 $A$  はプリアンプと積分器のゲインの積、 $B$  はフィードバックのゲイン、 $V_i$  は SQUID 固有のノイズ、 $V_n$  はアンプノイズを表し、 $V_{out}$  は次式で表される。

$$V_{out}(s) = \frac{\phi_{in} \frac{dV}{d\phi} + V_i + V_n}{\frac{s}{A} + B \frac{dV}{d\phi}} \quad (1)$$

$A$  が無限大の理想状態を考えると  $V_{out}$  は、

$$V_{out}(s) = \frac{\phi_{in}}{B} + \frac{V_i + V_n}{B \frac{dV}{d\phi}} \quad (2)$$

で与えられる。実験結果からも分かるように RF ノイズにより変調深さ  $\Delta V$  が減少し、 $dV/d\phi$  も減少するため第 2 項目が目立ってくる。これにより SN 比

$$S/N = (dV/d\phi) \phi_{in} / (V_i + V_n) \quad (3)$$

が低下する。逆にいうと  $dV/d\phi$  が大きいほど、センサとしてよい性能を持つ。また、式(1)よりシステムのカットオフ周波数が、

$$f_c = AB(dV/d\phi) / (2\pi) \quad (4)$$

と表されることから  $\phi-V$  特性の劣化はセンサのカットオフ周波数低下につながる。

今回の実験により銅メッシュ内では携帯電話の使用が圏外となるが、電磁シールド外 30 cm 程度の距離に置かれた携帯電話が、通信あるいは他の電話から呼び出し時に発生するパースト的な信号<sup>6)</sup>は電磁シールド内でも十分に観測が可能な振幅を持ち、同時に  $\phi-V$  特性にノイズとして影響を与える。Fig. 12(a)は電磁シールド内外において小型アンテナが捕らえた RF ノイズ (平均化なし)、(b)はその時の電磁シールド内に置かれた SQUID センサの  $\phi-V$  特性を示したものである。パースト的な信号が入った時のみ、 $\Delta V$  および  $dV/d\phi$  がほとんど出なくなることで糸の切れた風のように制御を失い、センサ出力に影響を与える。

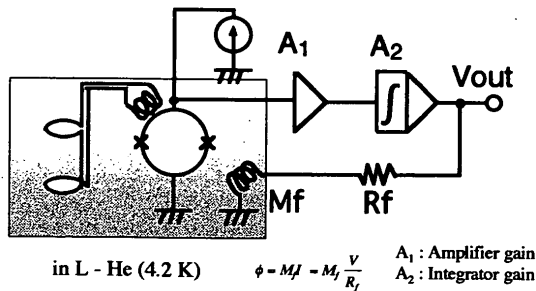


Fig. 10 dc-SQUID sensor in flux-locked loop mode.

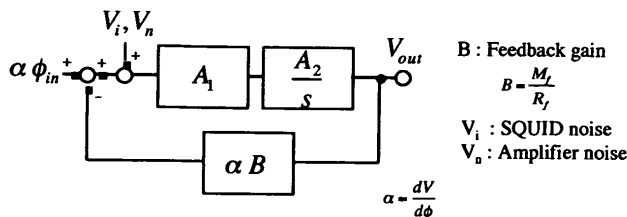
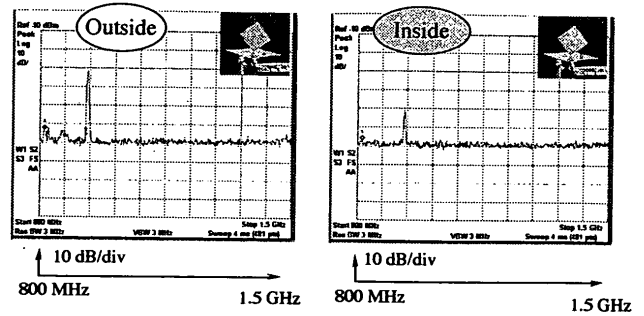
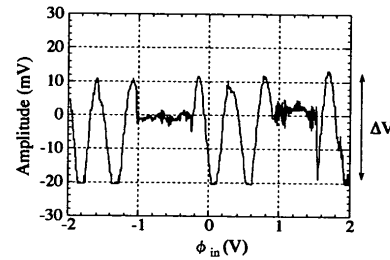


Fig. 11 Block diagram of flux-locked operation.



(a) RF noise spectrums



(b)  $\phi-V$  curve of a SQUID sensor located in the copper mesh shield with permalloy shield

Fig. 12 Effect of mobile phone noise when a phone was located near copper mesh shield and it was called from another phone.

### 5. まとめ

RF ノイズは SQUID センサの性能に影響を与える。研究室環境下の RF ノイズを銅メッシュの電磁シールドで低減することで SQUID センサに与える効果を調べるとともに、その RF ノイズの違いを小型のアンテナにより 300 MHz~2 GHz について測定した。また円筒形磁気シールドの開口端にエミクロスを詰めることによる RF ノイズの低減を同アンテナにて確認し、この RF ノイズ環境の違いが与える SQUID センサへの効果も調べた。今回作成した小型アンテナで RF ノイズが計測できない程度まで低減されていれば SQUID センサの動作に影響を及ぼさないことが分かった。また、電磁シールド外に置かれた携帯電話であっても通信に使用するパースト的信号は作成した小型アンテナでも確認できる程度強く、電磁シールド内部に置かれた SQUID センサへもノイズとして影響を与えることが分かった。今後はこのようなノイズに対する対策も検討したい。

謝辞 本研究の一部は文部省科学研究費補助金基盤研究 A(1)の援助によって行われた。

### 文献

- 1) W. Andr a, H. Nowak (Eds.), "Magnetism in medicine", Wiley-VCH, Berlin, 87-135 (1998).
- 2) I. Sasada, E.Paperno, H. Koide, J. Magn. Soc. Japan, 24, 903 (2000).
- 3) N. Ishikawa, K. Nagata, H. Saito, N. Kasai and S.Kiryu, IEEE. Trans. on Magn., vol. 3, No. 2, 1910 (1993).
- 4) G. L. Romani, S. J. Williamson, and L. Kaufman, Rev. Sci. Instrum., 53, 1815 (1982).
- 5) J.E. Zimmerman, J. Apl. Phys. 48,702 (1982).
- 6) Association of Radio Industries and Businesses: Personal digital cellular telecommunication system, ARIB standard, RCR STD-27.

2001 年 10 月 9 日受理, 2002 年 1 月 17 日採録