

誘電体周期構造による二次元通信シートと外部空間の指向性電磁結合

門内靖明（東京大学） 篠田裕之（東京大学）

Directive Electromagnetic Coupling between Two-dimensional Communication Sheet and Air using Periodic Insulator

*Yasuaki Monnai (Univ. of Tokyo), Hiroyuki Shinoda (Univ. of Tokyo)

Abstract— We propose a novel Grating Antenna which consists of periodic insulators, and couples to a two-dimensional communication sheet to convert microwaves from guided modes into directive radiation modes. The mode conversion is based on the wavenumber modulation by periodic insulators on the communication sheet. The Grating Antenna enlarges spatial flexibility of two-dimensional communication.

Key Words: 二次元通信, ユビキタス, アンテナ

1 はじめに

近年、二次元導波路（通信シート）表面のマイクロ波近接場を介してデバイス間の通信・給電を行う二次元通信の概念が提案されており¹⁾、高効率な無線電力伝送や、マルチパス干渉および情報漏洩性の低い無線通信など、二次元的な電波局在性を生かした様々な応用が期待されている。

しかし、二次元通信のユビキタス環境への応用展開を考えた場合、各デバイスの配置が常に通信シート上に拘束されることは実用上の難点にもなりうる。

そこで本研究では、二次元通信の電波局在性と通常の無線通信の電波遍在性の両者のメリットを併せ持つ電波空間を構築するために、通信シート内部と外部空間の電磁場を、指向性を保ちつつ効率的に結合することができる誘電体周期構造（グレーティングアンテナ）を提案する。グレーティングアンテナとは、通信シート上に設置された誘電体グレーティングによって通信シート内のマイクロ波の導波モードと放射モードを相互に変換し、可動グレーティング周期によって結合の指向性を制御することのできるデバイスである。

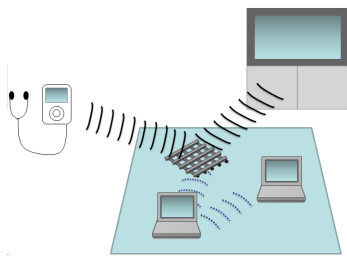


Fig. 1: The concept of directive electromagnetic couplings.

2 グレーティングアンテナの原理

提案するグレーティングアンテナは、Fig.2のように通信シートの上に置かれた誘電体グレーティングから成る。グレーティングの波数は通信シート中のマイクロ波の波数と同程度である。以下ではマイクロ波の伝搬方向を x 、通信シートの垂直上方向を z とし、TMモードの伝搬を考えることにする。

まず始めに、グレーティングのない通信シート単体中を伝搬するマイクロ波の導波モードについて説明する²⁾。通信シートとしては下から導体層・誘電体層・導

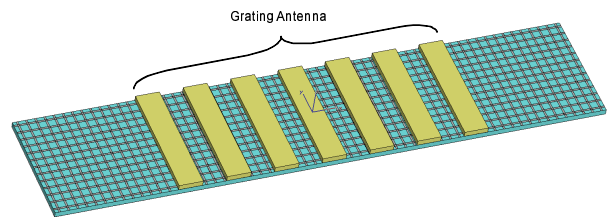


Fig. 2: Grating Antenna on the communication sheet

体メッシュ層の3層から成っているものを考える。マイクロ波は層界面での位相整合条件より定まる波数 β_g で全反射を繰り返しながら誘電体中を伝搬し、メッシュ層表面において z 方向に $e^{-k_a z}$ の形で減衰する近接場を形成する。ここで β_g, k_a は

$$\beta_g^2 = \varepsilon_s \mu_s \omega^2 - \frac{j\eta \varepsilon_s \omega}{t_s} \quad (1)$$

$$k_a^2 = \beta_g^2 - \varepsilon_a \mu_a \omega^2 \quad (2)$$

によって与えられる。 $\varepsilon_s, \mu_s, \varepsilon_a, \mu_a$ はそれぞれ通信シート中と外部空間中での誘電率、透磁率であり、 ω はマイクロ波の周波数、 η はメッシュ層のインピーダンス、 t_s は通信シートの厚みである。理想導体によって構成されたメッシュの場合、インピーダンスは誘導性になるので η は純虚数、 β_g および k_a は実数となる。

次に、グレーティングアンテナによる導波モードから放射モードへの変換について説明する。グレーティングを構成する各誘電体の誘電率 ε_p は $\varepsilon_p > \varepsilon_s$ を満たしているとする。誘電率の周期的な分布によって通信シート内には空間高調波が生じ、波数 β_g で伝搬していたマイクロ波は

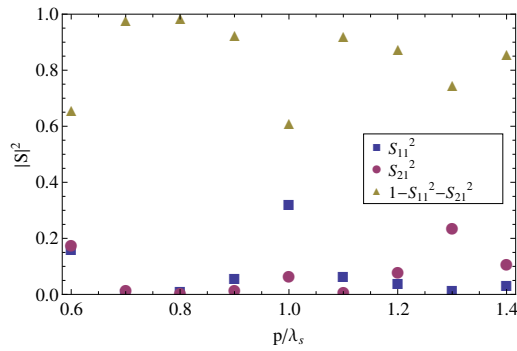
$$\beta_n = \beta_g + n\beta_p \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (3)$$

なる波数変調を受けた波の重ね合わせと見なせるようになる。ただし β_p はグレーティングの波数である。このとき各高調波に対して (2) 式は

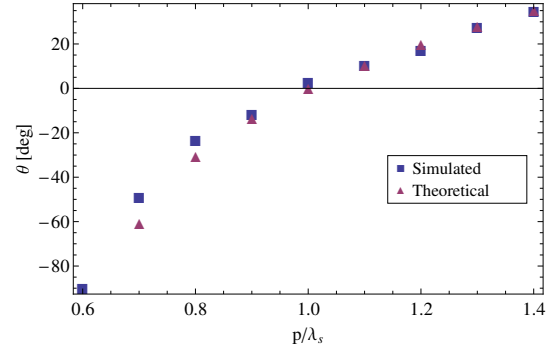
$$\begin{aligned} k_{an}^2 &= \beta_n^2 - \varepsilon_a \mu_a \omega^2 \\ &= (\beta_g + n\beta_p)^2 - \varepsilon_a \mu_a \omega^2 \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで、ある整数 m に対して

$$(\beta_g + m\beta_p)^2 < \varepsilon_a \mu_a \omega^2 \quad (5)$$

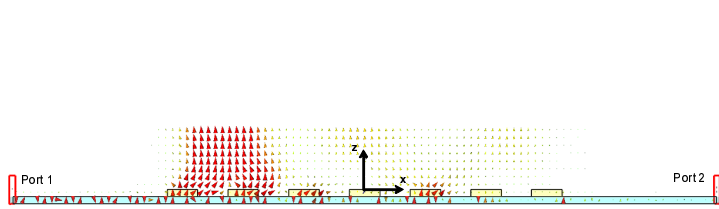
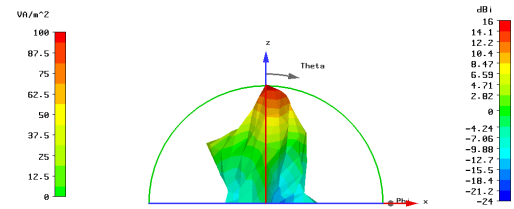


(a)



(b)

Fig. 3: Effect of a grating period on (a) S-parameters; (b) Radiation angles

Fig. 4: Poynting vectors around the Grating Antenna at $\beta_p \approx \beta_g$ Fig. 5: Directivity of the radiation at $\beta_p \approx \beta_g$

が成り立つと k_{am} は純虚数になる。つまり m 次高調波は外部空間へ放射される。これは形式的には界面で全反射している平面波の入射角を小さくすると透過成分が現れる状況に対応している。このとき放射角 θ_m は z 軸から測って

$$\theta_m = \sin^{-1} \left(\frac{\beta_m}{\sqrt{\epsilon_a \mu_a \omega^2}} \right) \quad (6)$$

によって与えられるので、 β_p を変化させれば θ_m を制御することができる。

3 シミュレーション結果

Fig.2 のグレーティングアンテナについて MW-STUDIO (AET Japan Inc.) を用いて有限積分法による電磁界シミュレーションを行った。入出力ポート 1, 2 は x 軸に垂直な通信シートの両端面に設定し、境界条件は全てオープンとした。各パラメータは以下のように設定した。

入力周波数 [GHz]	5.7	通信シート内比誘電率	4
		通信シート内誘電体厚 [mm]	3
		通信シート x 方向長 [mm]	305
グレーティング比誘電率	18	通信シート y 方向長 [mm]	65
グレーティング数	7	導体層/メッシュ層厚 [mm]	0.01
グレーティング幅 [mm]	13.2	メッシュ周期 [mm]	5
グレーティング厚 [mm]	3	メッシュ幅 [mm]	1

まず、グレーティングのない通信シート単体についてシミュレーションを行ったところ $S_{11} \approx 0.03$, $S_{21} \approx 0.99$ となった。これより単体の通信シート中ではほぼ全ての入射エネルギーが導波モードで伝搬し、放射はほとんど生じないことを確認した。

次に、グレーティングを設置して周期 p を変化させながらシミュレーションを行った。そのときの S パラメータ、および放射角の変化の様子を Fig.3 に示す。なお横軸は p を通信シート内の平面波波長 λ_s で規格化して示してある。Fig.3(a) より、 $p/\lambda_s \neq 0.6, 1$ のときには 9 割近くのエネルギが通信シートの外部に放出されていることがわかる。 $p/\lambda_s = 0.6, 1$ のときは 6 割程度に低下しているが、これは Bragg 反射の影響により S_{11} が大きくなったためと考えられる。Fig.3(b) より、放射角 θ の振る舞いは (6) 式とよく一致していることがわかる。 $p/\lambda_s = 0.6$ および $p/\lambda_s > 1$ のときは $m = -2$ に対応する方向への放射も若干生じていたが、エネルギーの大半は最低次の $m = -1$ に集中していたためここでは無視した。

$p/\lambda_s = 1$ のときのポインティングベクトル、および指向性の様子を Fig.4, Fig.5 に示す。左端のポート 1 から入力されたマイクロ波がグレーティング部で $\theta \approx 0^\circ$ の方向に集中的に放射されていることがわかる。

4 まとめ

本研究において、二次元通信シートと外部空間を指向的に電磁結合することのできるグレーティングアンテナを提案し、導波モードのエネルギの 9 割近くを放射モードに変換可能なことをシミュレーションによって示した。またその指向性は理論式によく一致することを確認した。今後、実機での実験を進める予定である。

参考文献

- 1) Yasutoshi Makino, Kouta Minamizawa, and Hiroyuki Shinoda: Two Dimensional Communication Technology for Networked Sensing System, Proc. INSS2005, San Diego, pp.168-173, June (2005)
- 2) 篠田裕之: 素材表面に形成する高速センサネットワーク, 計測と制御, Vol. 46, No. 2, pp. 98-103, 2007.