

無給電素子の正弦波振動を用いた変調散乱アンテナ

小畑 智也[†] 陳 強^{††}

[†] 東北大学大学院工学研究科 通信工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: [†]kobata.tomoya.r3@dc.tohoku.ac.jp, ^{††}qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

あらまし ショットキーダイオードを装荷した変調散乱素子を無給電素子とした変調散乱アンテナに関する研究が報告されているが、本報告では、無給電素子を機械的に正弦波振動させることにより、変調波を励振する新たな変調散乱アンテナを提案し、理論解析と実験の結果を述べる。

キーワード 変調散乱アンテナ, 無給電素子, 機械的振動, 無線通信, 移動通信

Modulated Scattering Antenna Using Sinusoidally Vibrated Passive Elements

Tomoya Kobata[†] Qiang Chen^{††}

[†] Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba 6-6-05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579 Japan

E-mail: [†]kobata.tomoya.r3@dc.tohoku.ac.jp, ^{††}qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

Abstract Research has been reported on modulated scattering antennas that utilize parasitic elements loaded with Schottky diodes as modulated scattering elements. In this paper, we propose a novel modulated scattering antenna that excites a modulated wave by applying sinusoidal mechanical vibration to a parasitic element. Theoretical analysis and experimental results are presented to demonstrate the performance of the proposed antenna.

Keywords modulated scattering antenna, passive elements, mechanical vibration, wireless communications, mobile communications

1. まえがき

近年、移動端末や IoT デバイスの普及に伴い、高速かつ安定した無線通信への需要が急速に高まっている。しかし、通信環境の面においては、遮蔽物によるマルチパスフェージングの影響が避けられない。特に、搬送波成分が干渉により減衰し、ヌルが生じると、通信品質が著しく低下することが大きな課題となっている。

この課題に対し、搬送波の他に変調波を設けた空間ダイバーシティによって、通信品質を向上させる試みが本研究の核となる。

変調波成分をどのように生じさせるかに関しては、電気的変調という手法がある[1][2][3]。この手法では、無給電素子にショットキーダイオードを装荷した構造となっており、水晶発振器からローカル信号を印加し、その信号を入力された RF 信号とミキシングさせることで、変調を発生させるものである。

この先行研究は、変調散乱素子を受信側として利用する電磁波測定システムの研究であるが、それを送信アンテナとして用いた場合、アンテナとして空間ダイバーシティの研究に応用できると考えられる。

しかし、ダイオードを用いた変調回路は、高周波電流を流すため、回路からのノイズが電波法の制約に抵

触する可能性がある。

そこで、本研究では、電気的変調ではなく、無給電素子の正弦波振動を用いた新たな変調散乱アンテナを提案する。本報告では理論解析及び数値計算と実験の両面により本アンテナの有効性を示す。

2. 理論解析による検討

まず、本研究の実験系モデルを図 1 に示す。線状ダイポールアンテナ素子の傍に、パイプレータで振動させた無給電素子を置き、変調を発生させ、スペクトルアナライザで受信電力から変調成分を図 2 のように取り出す。

十分な変調を得るため、振動変位が最大となる 25 Hz を駆動周波数に採用した 25 Hz は低速であり実用性には欠けるが、本報告は動作原理の確立を目的とした基礎研究と位置づけている。

理論解析において、本項では、変調に寄与する物理的なパラメータの特定に主軸を置いているため、実効的な長さを正弦波振動させる図 4 のようなモデルを用いた。

変調強度を示すには、出力複素振幅のフーリエ級数展開が必要であるが、その出力複素振幅は入射電力振幅を N とすると、図 3 に示すように散乱行列を用いて以下の式(1)で表せる。このとき、Port1 は送信アンテナ、Port2 は散乱素子であり、散乱素子は無給電である。

$$b_2 = \sqrt{N} * S_{21} \quad (1)$$

伝送係数 S_{21} は、特性インピーダンス Z_0 を 50Ω とすると、相互インピーダンスと自己インピーダンスを用いて以下の式(2)で示される。

$$S_{21} = \frac{2Z_0 Z_{11}}{(Z_{11} + Z_0)(Z_{22} + Z_0) - Z_{21}^2} \quad (2)$$

図 4 より、相互インピーダンス、自己インピーダンスは、散乱素子の正弦波振動を考慮した上で、積分を用いて導出する。

送信アンテナが散乱素子の微小区間に作るベクトルポテンシャルは給電点の電流振幅を I_{m1} とし、理想的な正弦波分布と仮定すると、以下の式(3)で表され、ベクトルポテンシャルから電界を導出する過程において、起電力法[5]を用いて電界は式(4)で表され、最終的に相互インピーダンスは式(5)で表される。

$$A_{z_2} = \int_{-\frac{l_1}{2}}^{\frac{l_1}{2}} \frac{\mu_0}{4\pi} I_{m1} \left[k \left(\frac{l_1}{2} - |Z_1| \right) \right] \cdot \frac{e^{-jkR}}{r} dz_1 \quad (3)$$

$$E_{z_2} = -j \frac{\eta I_{m1}}{4\pi} \left[\frac{e^{-jkR_1}}{R_1} + \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} - 2 \cos \left(\frac{kl_1}{2} \right) \frac{e^{-jkR}}{r} \right] \quad (4)$$

$$R_1 = \sqrt{\left(\frac{l_1}{2} - z_2 \right)^2 + d^2}, \quad R_2 = \sqrt{\left(\frac{l_1}{2} + z_2 \right)^2 + d^2}, \quad r = \sqrt{z_2^2 + d^2}$$

$$Z_{21} = - \frac{1}{I_{m1} \sin \left(\frac{kl_1}{2} \right) \sin \left(\frac{kl_2}{2} \right)} \int_{-\frac{l_2 + A \sin \omega t}{2}}^{\frac{l_2 + A \sin \omega t}{2}} \sin \left[k \left(\frac{l_2}{2} - |Z_2| \right) \right] dz_2 \quad (5)$$

同様に、自己インピーダンス Z_{11} 、 Z_{22} も求める。ここで、 Z_{21} はパラメータに散乱素子長 l_2 と送信アンテナ・散乱素子間距離 d を含むが、 Z_{22} は散乱素子長 l_2 のみ含むことに注意する。

以上から b_2 をフーリエ級数展開して図 5 の結果を得る。パイプレータの駆動周波数 25 Hz の倍数に変調成分が表れていることを確認した。

次に、変調強度に大きく寄与するパラメータを特定した。

図 6 は 25 Hz における変調強度の散乱素子長と送信

アンテナと散乱素子間の距離の関係を示した結果であるが、距離と比べ、素子長が変化すると、変調強度の変化率が大きいということが分かる。

変調強度に大きく寄与するパラメータは散乱体素子長であるという結論を得たが、そのメカニズムを理解するため、正弦波振動を与えるインピーダンスを以下の 3 パターンに場合分けして、対照実験を行った。結果を図 7 に示す。

<1>: 本来の振動が Z_{21} 、 Z_{22} の両方に寄与する

<2>: 仮定として、振動が Z_{22} にのみ寄与する

<3>: 仮定として、振動が Z_{21} にのみ寄与する

この結果からは、変調現象において、支配的なインピーダンスは自己インピーダンス Z_{22} であるということが分かる。

以上のことから、数学的考察としては、変調現象は主に自己インピーダンス Z_{22} が引き起こしているものであるが、 Z_{22} は素子長 l_2 のみを含む関数であるため、素子長 l_2 が変調に大きく寄与するパラメータとなったと言える。

物理的考察としては、変化量の相殺の有無が、変調強度の差をもたらす本質であると言える。 Z_{21} では、素子長 l_2 と距離 d の両方が含まれるが、本モデルの縦振動において距離 d に関する時間変化が三平方の定理より幾何学的に抑制されるだけでなく、 Z_{21} 関数内での素子長 l_2 に関する時間変化との干渉の影響を受け、全体的に変化量が小さくなる。一方で、 Z_{22} は純粋に素子長 l_2 のみに依存するため、相殺が生じず、支配的な変調成分が生じたと考えられる。

本理論解析では物理長の変動を前提としていたが、実験系においても、正弦波振動により散乱素子の電気長が変動するため、 Z_{22} の変動に寄与すると予想できる。

図 8 に理論値・実験値における距離 d と変調強度の関係を示す。物理長の変動と電気長の変動の違いにより絶対値は異なるが、散乱素子長が 0.5λ であるため、電流分布は理想的な正弦波に近いと考えられ、傾向はほとんど一致していることを示している。

図 9 には、理論値・実験値における素子長 l_2 と変調強度の関係を示す。距離と比較して、素子長の変化量に対する変調強度の変化量が大きいことが分かる。また、理論値と実験値を比較すると、素子長が 0.5λ 付近では、

傾向は似ているが、それ以外の領域では異なる挙動を示しており、電流分布を理想的な正弦波として扱う起電力法の限界がある。

まとめとして、図 8、図 9 の結果から、実験値においても素子長 l_2 が変調に大きく寄与するパラメータであると結論付け、理論との整合性を示すことができたと考える。

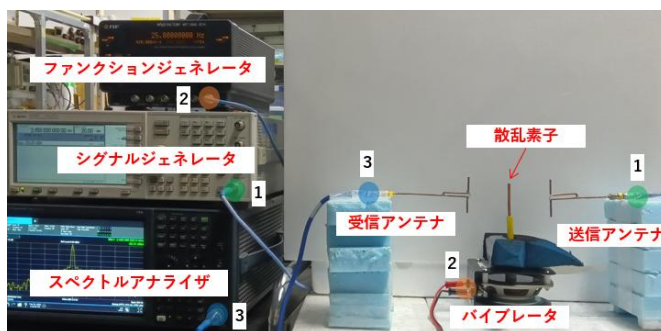


図 1：実験モデル

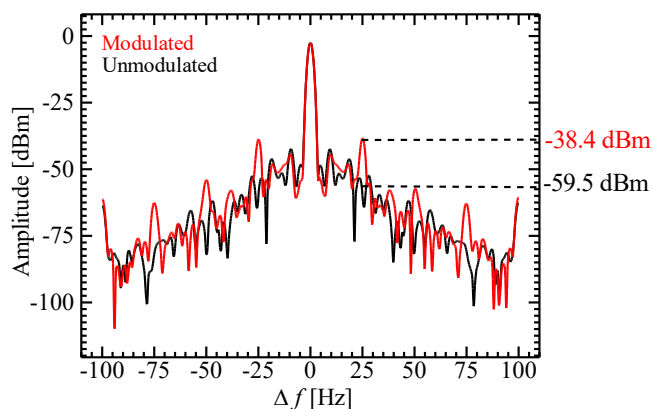


図 2：受信電力の周波数軸上表示

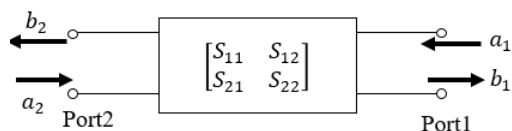


図 3：送信アンテナ・散乱素子間の散乱行列

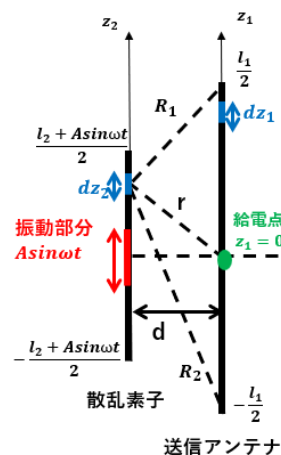


図 4：送信アンテナ・散乱素子の模式図

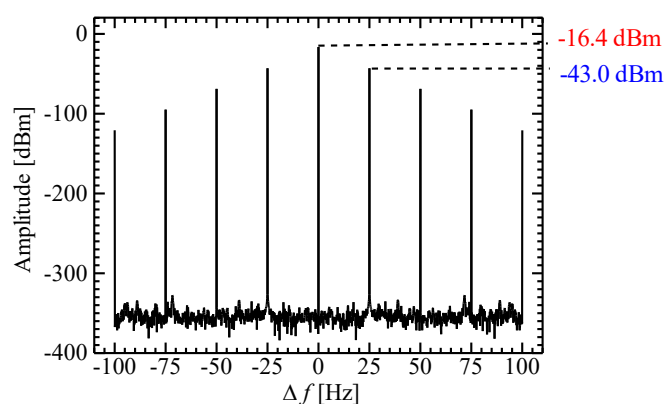


図 5：出力複素振幅 b_2 理論値の FFT 解析

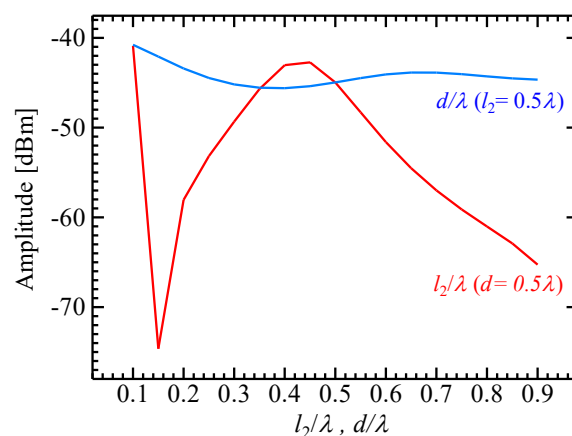


図 6：変調強度と素子長と距離の関係

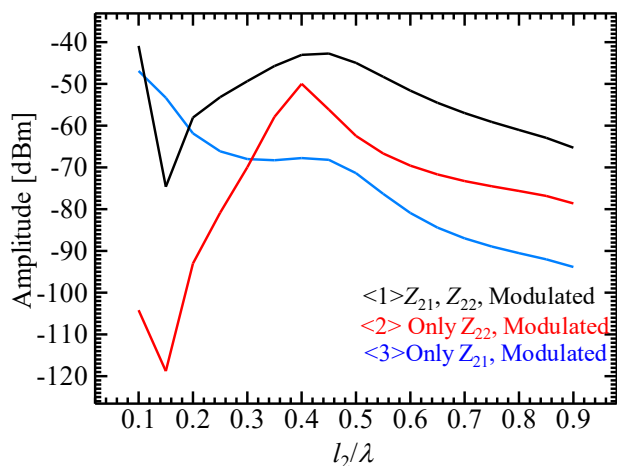


図 7：変調強度における対照実験

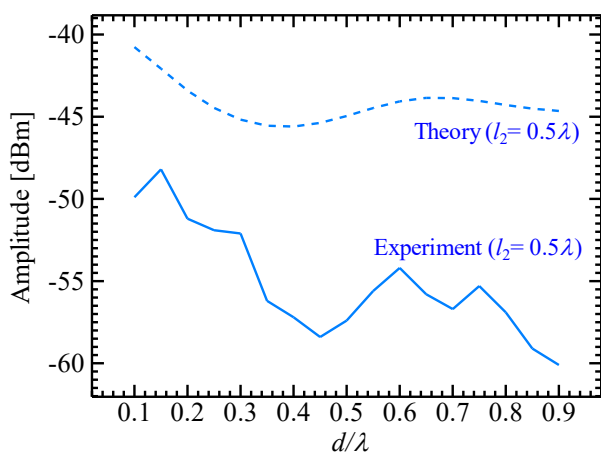


図 8：理論・実験における距離 d と変調強度の関係

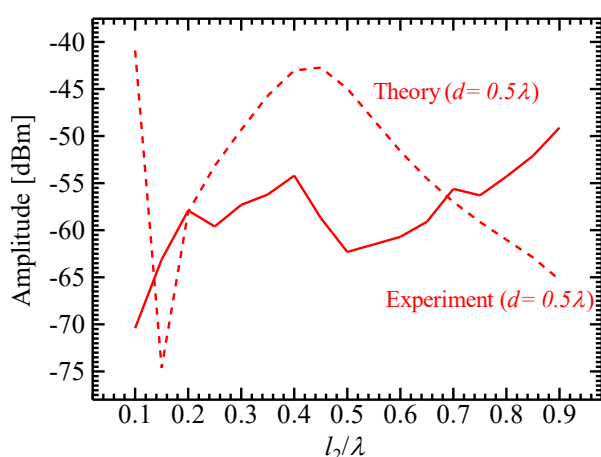


図 9: 理論・実験における素子長 l_2 と変調強度の関係

3. 実験による検討

本研究では移動通信を念頭に置いており、空間ダイバーシティが機能するような設計が望ましい。そのため、ある程度の変調強度を担保した上で、搬送波・変調波共に無指向性を成立させる素子長を求める必要がある。

図 10 のような実験系を組み、送信アンテナ 0.5λ の条件の下、散乱素子長を変化させて H 面指向性のパラメータスタディを行った。この際、パイプレータの筐体や金属の軸が振動して不要な散乱波を出さないように、図 11 に示すようにそれぞれ吸収体とフェライトコアを被せる対策を行った。

結果の一例を図 12 に示す、 $l_2 = 0.4\lambda, 0.5\lambda$ の搬送波の指向性においては、送信アンテナ素子長と散乱素子長から、それぞれ導波器、反射器として機能したと考えられる。

搬送波の指向性が滑らかな理由としては、搬送波は、送信アンテナの直接波と散乱素子から散乱される波成分の合計であるが、前者の成分の影響が大きかったためと考察できる。

一方で、変調波の指向性が散乱素子長によって大きく乱れてしまう理由として、素子長ごとの出力複素振幅の絶対値が関係する可能性が高い。回転時の散乱波の経路は大きく変化しないため、位相は大きくずれることはないが、特に素子長が 0.4λ 以上になると、出力複素振幅の絶対値が大きくなり、微小な位相変化が、最終的な出力電力に大きな差をもたらすと考えられる。

実験の結果から、 $0.2\lambda, 0.3\lambda$ において、搬送波・変調波共に無指向性に近い形が成立したが、図 13 に示すように変調強度においては、 0.3λ の素子長の方が平均して約 3.5 dB 高い結果を得た。

よって、指向性と強度の観点から、 0.3λ 付近が、本研究における最適散乱素子長であると結論付ける。

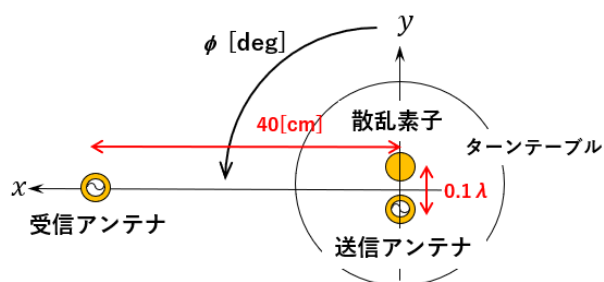


図 10：指向性実験系

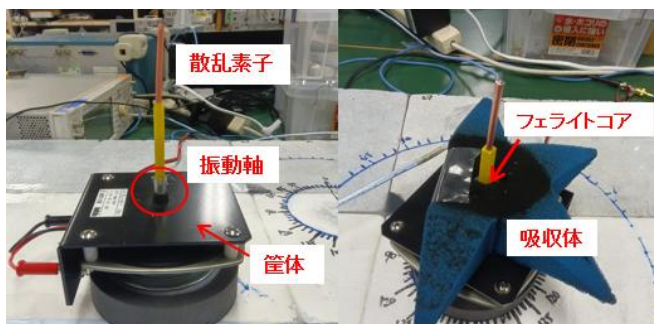
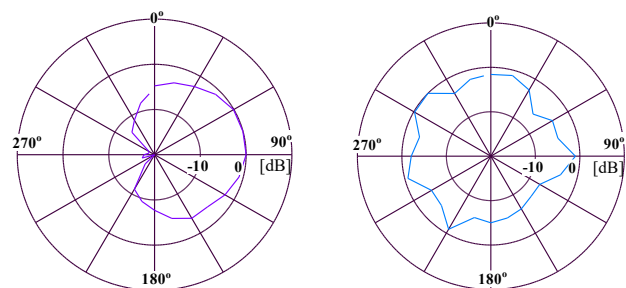
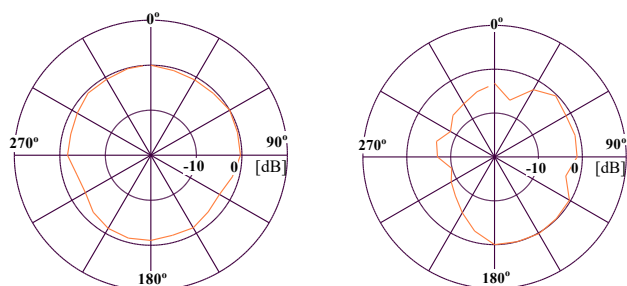


図 11：パイププレートにおける不要散乱波対策



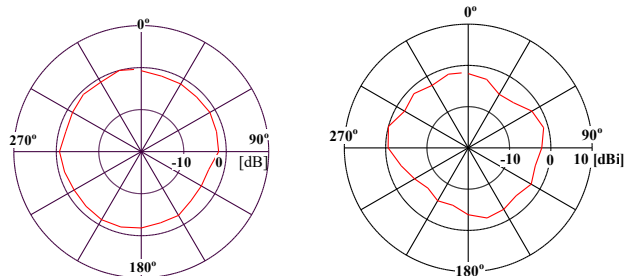
(g) $l_2 = 0.5\lambda$ (搬送波) (h) $l_2 = 0.5\lambda$ (変調波)

図 12：散乱素子長と指向性



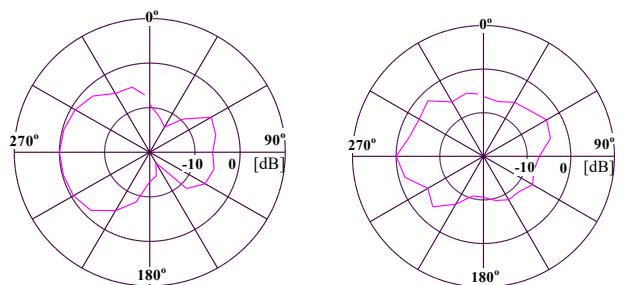
(a) $l_2 = 0.2\lambda$ (搬送波)

(b) $l_2 = 0.2\lambda$ (変調波)



(c) $l_2 = 0.3\lambda$ (搬送波)

(d) $l_2 = 0.3\lambda$ (変調波)



(e) $l_2 = 0.4\lambda$ (搬送波)

(f) $l_2 = 0.4\lambda$ (変調波)

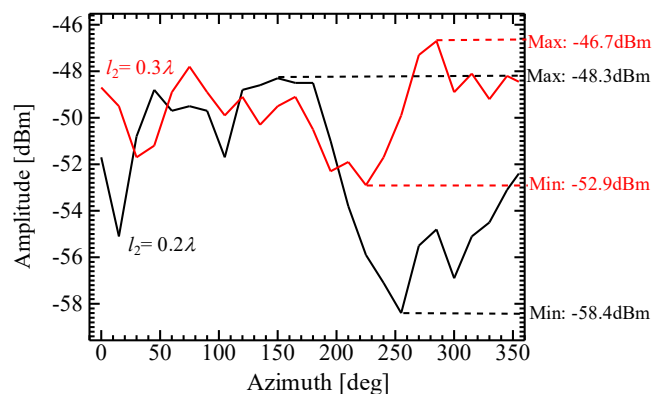


図 13： $l_2 = 0.2\lambda, 0.3\lambda$ における変調強度

4. まとめ

無給電素子の機械的振動を用いた変調散乱アンテナを提案した。

研究内容では、変調原理について検討し、変調強度に大きな影響を与えるパラメータが素子長であることを示し、また、実験からは所望の指向性を担保する最適な素子長を特定した。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 23H01407 と 22K04061 の助成を受けたものである。

文 献

- [1] 和田雅也, 陳強, 澤谷邦夫, “変調散乱素子を用いた電磁界の同時測定システム”, 電子情報通信学会総合大会, 2003 年.
- [2] Qiaowei Yuan, Masaya Ishizu, Qiang Chen, and Kunio Sawaya, “Modulated scattering array antennas for mobile handsets,” *IEICE Electronics Express*, vol. 2, no. 20, pp. 519-522, Oct. 2005.

- [3] Qiang Chen, Kunio Sawaya, Tomohiro Habu, and Ryoichi Hasumi, “Simultaneous Electromagnetic Measurement Using a Parallel Modulated Probe Array,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 2, pp. 263-269, May 2007.

- [4] Qiang Chen, Yoichiro Takeda, Qiaowei Yuan, and Kunio Sawaya, “Diversity performance of modulated scattering array antenna,” *IEICE Electronics Express*, vol. 4, no. 7, pp. 216-220, April 2007.

- [5] 遠藤敬二, 佐藤源貞, 永井淳, アンテナ工学, 総合電子出版社, 1979.