高次の TE および TM モードを用いた石油備蓄タンク内無線通信方式

正 員 久 保 洋 (山口大学)
非会員 玉 井 昌 徳 (山口大学)

Radio Communication System in Oil Storage Tank Using Higher Order TE and TM Modes

Hiroshi Kubo, Member, Masanori Tamai, Non-member (Yamaguchi University)

We study the radio communication system in oil storage tank, where many reflection waves exist. In order to decrease the reflection waves, we present a communication system using higher order TE and TM modes. Electromagnetic wave propagation in the tank is simulated numerically, so that it turns out DU ratio above 12dB can be realized.

キーワード：無線通信方式, 多重反射, FDTD 法, データ伝送

1. はじめに

石油備蓄タンクには定期的点検が義務付けられており、石油を抜き取った後、タンク底に溜まったスラッジ等の清掃を人が作業用車両に乗って行っている⁽¹⁾。タンク内は人が作業を行うにはあまり良い環境ではなく、無線通信を用いた車両の操作が考えられている。しかしながらタンク内は導体により囲まれた閉空間であり無線通信の観点より見ると特異な環境である。本稿ではタンク内での有効な通信方式を提案し、FDTD(Finite-Difference Time-Domain)法を用いてその評価を行ったので報告する。

2. 石油備蓄タンクでの電波伝搬

図1はタンク内での無線操作による清掃システムを模式的に示す。タンク外部の指令所と有線で結ばれたタンク中心部の親局と、移動局となる作業車両との間で無線通信が行われる。通信内容は双方向に制御データと移動局から親局へ複数の動画像情報をデジタル信号で送る。このためデータの伝送速度は数 Mbps となる。タンク上部導体は石油の抜き取り時に液面と共に下がり清掃作業空間確保のためある位置に固定されるが、ここではこの高さを 1.8m とし、また半径は 35m で計算を行っている。これらの数値は個々のタンクにおいていくらか変わり得るが、本稿の議論に本質的な影響は与えないと考える。また、搬送波周波数は必要

図1 無線操作による石油備蓄タンク清掃システム

Fig.1. Radio control cleaning system in oil storage tank.

な帯域も考えて 1.2GHz とした。

まず、タンク中心のモノポールアンテナから送信したとき、 $r=9.1\text{m}, z=0.9\text{m}$ の点における E_z 波形を図2に示す。縦軸はアンテナから直接到達した波の振幅で正規化しており、以降の図においても同様の処理を行っている。直接波に続いて $t = 0.20\mu\text{sec}$ よりタンク側壁からの反射波がこれに重なり、 $t = 0.26\mu\text{sec}$ よりアンテナに関して反対側の側壁からの反射波がさらに重なる。以降においてはこれらが多重反射されて繰り返し重なっていく。反射波が重なる度に振幅、位相は大きく変動し、また反射を繰り返した波は時間的に遅れたデータを運んでいるため正常なデータ受信は難しい。

3. 反射波の影響の軽減

タンクは上下面が導体であり、高さに比べ半径方向に十分長いことから平行平板導波路と見なせ、電磁界はその固有モードで表現出来る。またその伝搬モードのうち最高次モードが最も減衰率が高い。反射波は直接波に比べ伝搬距離が長いので、減衰率が高いモードを使えば直接波に対する反射波の比率を下げる事が出来る。また反射波の中で最も大きいのは1回反射された波で、より多く反射さ

図2 モノポールアンテナで送信したときの E_z の波形

Fig.2. E_z waveform excited by monopole antenna in oil storage tank.

れた波の影響は比較的小さい。この1回反射の波の影響を取り除くことを考える。タンク内ではTEおよびTMモードが伝搬するが、 H_z はTEモードのみに存在し、 E_z はTMモードのみに存在する。タンク側壁では反射により H_z の位相は変化せず E_z の位相は π だけずれる。一方これらのモードは縮退しているため位相定数が等しく側壁の反射以外には位相関係が変わることはない。送信側でTEとTMの2つのモードを励振し、そのときの位相差を ϕ とすると、タンク内にはその H_z と E_z の位相差が ϕ の波のペアと $\phi + \pi$ の波のペアが伝搬していることになる。受信側において H_z と E_z を別々に受信し、位相を $-\phi$ だけずらし、振幅を適切に変換して合波する。この結果、直接波および偶数回反射された波のペアにおいては H_z と E_z は同相で重ね合わされ、奇数回反射された波のペアでは逆相になるため相殺される。

4. 数値シミュレーション

高さ1.8mの平行平板において最高次となる14番目のモードTE₁₄およびTM₁₄を用い、それぞれの受信波を重ね合わせることで反射波の影響を低減する。この方式を評価するためにFDTD法を用いて伝搬シミュレーションを行う。備蓄タンクを構成する鉄板を表面抵抗0.596Ωの導体としてFDTD法の定式化に取り込む⁽²⁾。各モードの z 方向への電磁界分布が確定しているので解析は水平面内の電磁界計算に簡便化される。さてタンク中心からTE₁₄あるいはTM₁₄モードを励振し、 $r=9.1\text{m}$ における反射波の波形を図3に示す。タンク側壁を吸収境界で置き換えて直接波だけをあらかじめ計算しておき、通常の受信波から除くことで反射波形を得ている。図3(a)には E_z の波形を示しており $t=1.0\mu\text{sec}$ で1回反射の波、 $t=2.5\mu\text{sec}$ で2回反射の波が到達している。(b)には E_z と H_z に前節での処理を行った波形が示され、1回反射の波が小さくなっていることが分かる。反射が6回程度繰り返された $t=7\mu\text{sec}$ 以降では振幅がほぼ定常状態になっている。このときの振幅を妨害波レベルUとし、直接波の振幅を希望波レベルDとして、この比率を受信状態の指標とする。図4はタンク内のDU比の分布を示す。DU比はどの点でも4dB以上であり、DU比の分布が管内波長 $\lambda_g=1.4\text{m}$ の1/4毎に良い点と悪い点を繰り返している。これはタンク両側壁から来る反射波により定在波が出来るためと考えられる。この結果

図3 $r=9.1\text{m}$ におけるシミュレーション波形
(a) E_z の規格化反射波形 (b) H_x と E_z の反射波から合波した波形

Fig. 3. Simulated waveform at $r = 9.1\text{m}$
(a)Reflection waveform of E_z (b)Waveform synthesized from reflected H_x and E_z .

図4 DU比の分布

Fig. 4. Distribution of DU ratio from the center.

図5 送受信点を入れ替えた場合のDU比分布

Fig. 5. Distribution of DU ratio for transmission point (TP) at $r=0\text{m}$ or 10.7m .

半波長の範囲で空間ダイバーシティを適用することによって12dB以上のDU比が得られる。

図5は $r=10.7\text{m}$ の点から送信したときタンク中心付近におけるDU比を実線で表している。また点線はこの逆に中心から送信したときの $r=10.7\text{m}$ 付近でのDU比を示す。横軸は送受信間の距離である。送受信を入れ替えてもほぼ同じDU比が得られ、相反性が数値的に確認された。またこれはここでやっている数値計算の妥当性を示している。実際には移動局からタンク中心の親局に画像データが送信されるが、相反性を考慮すれば、中心から離れた点より送信したとき、中心点において得られるDU比は図5の結果とほぼ同程度であると考えられる。

5. まとめ

今回、石油備蓄タンク内という特殊環境における通信方式としてTE波とTM波の高次モードを利用する方式を提案した。電波伝搬解析の結果より空間ダイバーシティを行うことで12dB程度のDU比を確保出来ることが示された。タンクのような閉空間内では搬送波が大きく減衰しないため熱雑音の影響は非常に小さい。従って、12dBのDU比では2相PSKで約 10^{-8} 程度のビット誤り率となり、H.261等の画像伝送においても支障のない値と考えられる。

(平成12年8月30日受付, 同12年11月1日再受付)

文 献

- (1) 山根一真:「メタルカラーの時代」, 小学館, 1993
- (2) Mitsuo Hano and Masato Nishimura: "Non-cubic-cell Time-domain method and its application to eigenvalue problems", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol.33, No.2, pp.1552-1555, 1997