

FMCW技術の電離圏観測への適応  
野崎憲朗（通信総合研究所）

はじめに

FMCW 方式のレーダーは小型・軽量・低電力といった特長を生かして移動観測や簡便な通信回線の評価に用いられているが、これまで位相連続しながら正確に周波数掃引するシンセサイザが高価であり、データ処理が複雑だったので価格の面で不利であった。歴史的にパルスレーダーが先行して開発されたので、現在でも必要な用途に限られて用いられている(例えば Ogawa et. al., 2002, Maruyama et. al., 2002)。最近では DDS(Digital Direct Synthesizer) が容易に手にはいるようになり、送受信機のデジタル化が進んだのでノート PC 1 台で遠隔地で観測制御から観測データの保存までできるようになり、さらに小型軽量化が進んだ。

通信総合研究所の電離層定常観測用のパルス方式イオノゾンデと開発中の FMCW イオノゾンデを図 1 に示す。

パルス圧縮利得

FMCW レーダーでは受信機でベースバンド信号を時間  $T$  の間積分して大きなパルス圧縮利得  $G$  を得るが、

$$G = F \cdot T = f \cdot T^2 \quad (1)$$

ここで  $f$  は観測周波数で、 $F = f \cdot T$  で表される。距離  $r$ 、速度  $v$  のターゲットを周波数  $f$  で観測するとベースバンド信号の周波数  $f_b$  は

$$f_b = \frac{2}{c} (fr - fv) \quad (2)$$

で表される。但し、 $c$  は光の速度。距離分解能  $r$  は

$$r = \frac{c}{2F} \quad (3)$$

となり、掃引する周波数の幅で距離分解能が決まる。

FMCW レーダーの大きな利点は観測後のデータ解析時に解析区間を任意に設定できることにあり、例えば周波数掃引速度 100kHz/s で 1 秒間のデータを切り出すと  $G=10^5$ 、 $r=1.5\text{km}$  を容易に得ることができる。(1),(3) 式から距離分解能を上げるほどパルス圧縮利得が大きくなり、FMCW 方式の利点が生じる。このためには切り出す時間が長くなり、高速で動くターゲットの観測には適さない。

送受切り替え

短波帯では送信信号が受信アンテナに回り込むのを防ぐため、送受信アンテナを 100km 以上離すバイスタティック観測か、送受信を交互に切り替える FMICW(Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave) 観測が行われる。FMICW ではパルス圧縮利得が低下するだけでなく、送信信号



図 1 定常観測用のイオノゾンデ（右奥）と FMCW イオノゾンデ（手前、机の上）

をパルス変調するため観測信号のスペクトルが広がり、強いエコーが弱いエコーをマスクする自家中毒現象が生じる(Poole, 1979)が、コヒーレント散乱を観測することもできる(Nozaki and Kobayashi, 1993)。また、レーダ感度に距離特性が生じる。観測するターゲットの特性に応じて送受信を単一周波数で切り替えたり(梅原他、1991)、ランダムに切り替える(Poole, 1985)。

### ドップラ観測

イオノゾンデ観測のようにターゲットの境界がはっきりしている場合はMTIの手法を用いたり(篠原、2000)、掃引速度を変えて速度と距離を同時に観測する。Poole and Evance(1985)は3セル法でイオノグラムとドップラ観測を同時に行った。コヒーレント散乱のようにターゲットの境界がはっきりしない場合はパルスレーダ同様、FFTで各レンジビンの位相の回転を測定するドップラ観測が行われる(梅原他、1991)。九州大学では電離層反射波のドップラ観測を行い、電離層の上下運動から電離圏にかかる電場を推測する手法を開発している(石原、2003)。

通常は1回の掃引を1パルスと見立ててドップラ処理を行うので、距離分解能を上げると最高観測速度が低下するが、データ処理の段階でデータを重ねて切り出すと高速のターゲットでも高い距離分解能で観測することが可能となる。合成開口レーダのように距離-速度空間のレンジビンから生じる参照信号と相互相関をとる解析手法も考えられる。

### まとめ

FMCWレーダは高度なパルス圧縮なのでターゲットの属性に応じて観測パラメータを設定する自由度が大きい。FMCWレーダはパルス圧縮効率を追求すると低速のターゲットを高い距離分解能で観測するのに適しているが、データ処理方法を工夫すれば速度と距離を同時に高い精度で観測できる可能性がある。

### 文献

- Maruyama T., K. Nozaki, M. Yamamoto, and S. Fukao, Ionospheric height changes at two closely spread equatorial stations and implications in spread F onsets, JATP., 64, 1557, 202.
- Nozaki, K. and T. Kobayashi, Observation of low-latitude ionospheric irregularities using HF FM/CW radar, Proc., COSPAR Colloquium on Low-Latitude ionos. phys., Taipei, p.121, 1993.
- Ogawa T., O Takahashi, Y. Otsuka, K. Nozaki, M. Yamamoto, and K. Kita, Simultaneous middle and upper atmosphere radar and ionospheric sounder observations of midlatitude E region irregularities and sporadic E layer, JGR., 107, 1275, 2002.
- Poole A.W.V., On the use of pseudorandom codes for "Chirp" radar, IEEE Trans., AP-27, 480, 1979.
- Poole, A.W.V., Advanced sounding 1. The FMCW alternative, Radio Sci., 20, 1609, 1985.
- Poole, A.W.V. and G. P. Evance, Advanced sounding 1. First results from an advanced chirp ionosonde, Radio Sci., 20, 1617, 1985.
- 石原隆一 「短波帯 FM-CW レーダシステム構築による新しい電離層観測手法の開発研究と地磁気変動との比較研究」 九州大学大学院平成14年度修士学位論文
- 梅原俊彦、大野裕一、井口俊夫 「短波海洋レーダ 5 . 海洋レーダのデータ処理」 通信総研季報 37, 383, 1991
- 篠原学、湯元清文、野崎憲朗、CPMN and Westpac 観測グループ 「FM-CW レーダーによる Sc 発生時の電離圏電場の観測」 第108回 SGEPS 講演会、2000