

# 基于 OFDM 传输技术的数字地面电视广播信号模糊函数的研究

张颖辉 陶然 王越 周思永  
(北京理工大学电子工程系 北京 100081)

**摘要** 该文对基于 OFDM 技术的数字电视地面广播信号的各种特性进行了深入的分析、研究,重点讨论了采用 OFDM 信号做为非合作式照射源的双基地雷达探测系统的理论可行性。分析表明 OFDM 信号具有极好的模糊函数性能,是一种利用价值极高的非合作式照射源,对该雷达探测系统的进一步研究有一定的参考价值。

**关键词** 双基地雷达, 数字地面电视, OFDM, 模糊函数

中图分类号: TN941.1, TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1485-03

## Ambiguity Function of Digital Terrestrial TV Based on OFDM

Zhang Ying-hui Tao Ran Wang Yue Zhou Si-yong

(Dept. of Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** A comprehensive research on digital terrestrial TV signal based on OFDM is conduct, especially the theoretics feasibility of non-cooperative illumination using OFDM signal is analysed. It is shown that the ambiguity function of OFDM signal has good performance and OFDM signal is good for non-cooperative illumination. The result of this paper provide a theoretic foundation for the farther research of this kind of radar system.

**Key words** Bistatic radar, Digital terrestrial TV, OFDM, Ambiguity function

### 1 引言

20 世纪以来的几次局部战争,再一次使人们认识到了电子战和信息战的现实性和残酷性,尤其是战术上的弱方迫切需要采用适合在新战争模式下生存的雷达体制,使得非合作式照射源雷达系统的研究倍受关注,非合作式照射源可以有多种来源,对于在 VHF 和 UHF 之间的频段,大部分都分配给了广播电视使用,因此要利用这一段的频谱的照射源,对广播电视信号的研究至关重要。

目前,对基于模拟电视及调频广播的非合作式雷达系统的研究已较为成熟,世界上已有多个系统投入使用,并取得了良好的效果。随着数字广播电视技术的出现和发展,广播电视领域已经掀起了数字化的浪潮,各个国家都根据自己的国情,分别制定出由模拟电视向数字电视过渡的方案和产业目标,数字电视最终将会完全取代现存的模拟电视。因此,利用数字地面电视广播信号做照射源的非合作式双基地雷达系统是目前最具有现实性、普及性的一种非合作式双基地雷达体制<sup>[4]</sup>。

### 2 基于 OFDM 传输技术的数字电视地面广播信号基本模型

OFDM 是一种多载波调制方式,其基本思想是通过多载波的并行传输方式将高速率的串行数据符号变换成低速率的  $N$  路并行数据流,然后用  $N$  个相互正交的载波进行调制,最后将  $N$  路调制后的信号相加即得一个最终的 OFDM

符号。因此每一个 OFDM 符号之内都包含了  $N$  个经过调制的子载波的合成信号,其中每个子载波都可以采用不同的调制方式。

OFDM 系统的基本模型框图如图 1 所示。假设  $N$  表示子载波的个数,  $T$  表示 OFDM 符号的宽度,  $f_k$  是第  $k$  个子载波的载波频率,则一个 OFDM 符号块可表示为<sup>[1]</sup>

$$s(t) = \begin{cases} \text{Re} \left[ \sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{j(2\pi f_k t + \phi_k)} \right], & 0 \leq t \leq T \\ 0, & t < 0 \cap t > T \end{cases} \quad (1)$$

其中  $f_k = k/T$ ,  $d_k (k=0, 1, \dots, N-1)$  是分配给每个子载波的数据符号,可以看成为第  $k$  个已调载波的幅度,  $\phi_k$  为第  $k$  个已调载波的相位。实际传输的信号是  $s(t)$  的实数部分,其  $d_k$  和  $\phi_k$  是随逐个调制符号变化的。

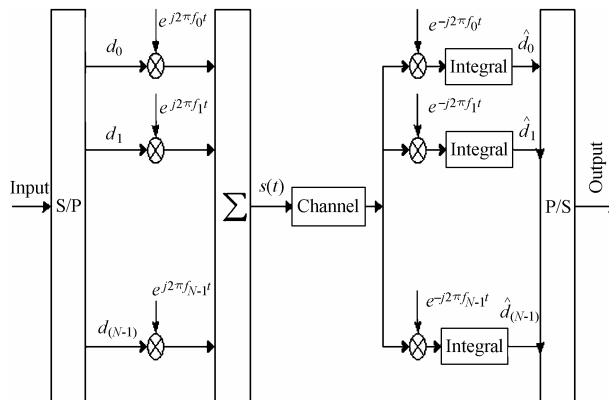


图 1 OFDM 系统模型框图

Fig.1 Block diagram of OFDM system

由于 OFDM 信号在时域是一系列矩形码元, 故在频域每个子载波信号的频谱均为 sinc(x)函数, 并且与相邻子载波信号的频谱有 1/2 的重叠, 这使每个载波都以其它载波的零点为中心, 体现了 OFDM 符号载波间的正交性(参见图 2)。

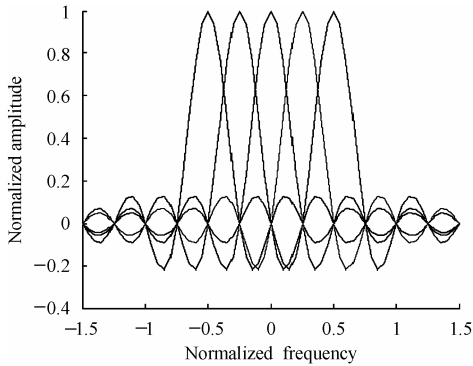


图 2 OFDM 信号频谱  
Fig.2 OFDM spectrum

### 3 OFDM 调制技术的数字电视地面广播信号的自相关函数及模糊函数分析

#### 3.1 OFDM 信号的自相关函数及功率谱密度

由式(1)知, 在基于OFDM调制技术的数字电视地面广播中, 由发射机发出的每个OFDM符号是一个随机信号, 其中  $d_k$  为随机变量, 与调制方式有关;  $\phi_k$  是在  $(0, 2\pi)$  上均匀分布的随机相位。现假设对所有随机变量  $d_k$  和  $\phi_k (k=1, 2, \dots, N)$  都是统计独立的, 则  $s(t)$  的自相关函数为

$$\begin{aligned} R_s(t, t + \tau) &= E[s^*(t)s(t + \tau)] \\ &= E\left[\sum_{k=0}^{N-1} d_k e^{-j\left(2\pi\frac{k}{T}t + \phi_k\right)} \sum_{l=0}^{N-1} d_l e^{j\left(2\pi\frac{l}{T}t + 2\pi\frac{l}{T}\tau + \phi_l\right)}\right] \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} e^{j\left(2\pi\frac{l}{T}t - 2\pi\frac{k}{T}t\right)} e^{j2\pi\frac{l}{T}\tau} E[d_k d_l e^{j(\phi_l - \phi_k)}] \end{aligned} \quad (2)$$

因为  $d_k$  和  $\phi_k (k=1, 2, \dots, N)$  都是统计独立的, 所以

$$R_s(t, t + \tau) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} e^{j\left(2\pi\frac{l}{T}t - 2\pi\frac{k}{T}t\right)} e^{j2\pi\frac{l}{T}\tau} E[d_k d_l] E[e^{j(\phi_l - \phi_k)}] \quad (3)$$

由于  $\phi_k$  是在  $(0, 2\pi)$  上均匀分布的随机相位, 于是

$$\begin{aligned} E[\exp(j(\phi_l - \phi_k))] &= E[\cos(\phi_l - \phi_k) + j\sin(\phi_l - \phi_k)] \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{(2\pi)^2} [\cos(\phi_l - \phi_k) + j\sin(\phi_l - \phi_k)] d\phi_l d\phi_k \\ &= \begin{cases} 0, & k \neq l \\ 1, & k = l \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

于是式(3)变为

$$R_s(t, t + \tau) = \sum_{k=0}^{N-1} e^{j2\pi\frac{k}{T}\tau} E[d_k^2] = R_s(\tau) \quad (5)$$

由上式可以看出, OFDM 信号的自相关函数与时间  $t$  的值无关, 因而是一个平稳随机过程。对于一个平稳的随机

过程, 其自相关函数和功率谱密度构成一对傅里叶变换对。即可通过自相关函数的傅里叶变换得出功率谱密度  $|S(f)|^2$ , 即

$$\begin{aligned} |S(f)|^2 &= \frac{1}{T} \int_0^T R_s(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \\ &= \frac{1}{T} E[|d_k|^2] \sum_{k=0}^{N-1} \left| T \frac{\sin((f - k/T)T)}{(f - k/T)T} \right|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

由上式可看出, OFDM信号的功率谱密度实际上为  $N$  个子载波上信号的功率谱密度之和。图 3 给出了  $N=8$  的 OFDM 信号的功率谱密度图。图中给出的是当各子载波具有相同的发送功率时的 OFDM 符号, 由图 3 可以清楚地看到, 8 个子载波在频率上依次间隔  $1/T$ , 所有 8 个子载波功率谱密度之和构成总的功率谱密度图, 即最外围的包络谱线。实际上, 由于各个子载波调制符号的幅度是不同的, 因此总的功率谱密度并不是恒定的, 根据各个子载波不同的幅度  $d_k$ , 带内的功率谱是有起伏而不是很平坦。

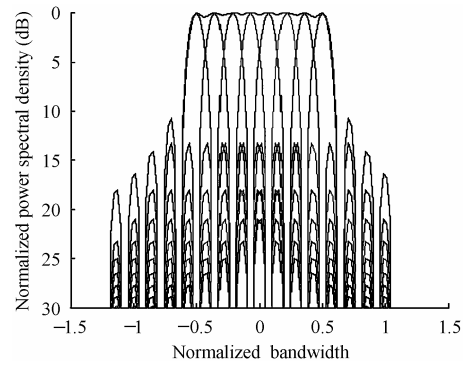


图 3 OFDM 信号的功率谱密度  
Fig.3 OFDM power spectral density

#### 3.2 OFDM 信号的模糊函数

模糊函数是分析、比较雷达信号的有力工具, 它用来衡量波形的分辨力、模糊度、测量精度和抑制杂波能力。其定义为<sup>[2]</sup>

$$\chi(\tau, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t + \tau) e^{j2\pi\xi t} dt \quad (7)$$

由于基于 OFDM 传输技术的数字电视地面广播信号, 可以认为是一个平稳的复随机过程, 因而无法得出其模糊函数的确定性表达式, 但仍可根据其统计特性来确定其在统计平均意义下的平均模糊函数  $\overline{\chi(\tau, \xi)}$ , 即

$$\begin{aligned} \overline{\chi(\tau, \xi)} &= E\left[\int_{-\infty}^{\infty} s(t)s^*(t + \tau) e^{j2\pi\xi t} dt\right] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} E[s(t)s^*(t + \tau)] e^{j2\pi\xi t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} R_s^*(\tau) e^{j2\pi\xi t} dt \end{aligned} \quad (8)$$

式中  $E[\cdot]$  表示求统计平均, 上标\*代表共轭。由式(5)知:

$$R_s(\tau) = \sum_{k=0}^{N-1} e^{j2\pi\frac{k}{T}\tau} E[d_k^2] \quad (9)$$

式中  $E[d_k^2]$  为数据符号的平均功率, 令  $E[d_k^2] = E_d$ , 这样式 (9) 可以看成是一个有限项的几何级数, 因此可以利用几何级数的特性对其做进一步的整理:

$$\begin{aligned} R_s(\tau) &= E_d \sum_{k=0}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k}{T} \tau} \\ &= E_d \frac{1 - e^{j2\pi N \tau / T}}{1 - e^{j2\pi \tau / T}} \\ &= E_d \frac{\sin(\pi N \tau / T)}{\sin(\pi \tau / T)} e^{j\pi(N-1)\tau / T} \end{aligned} \quad (10)$$

假设每次检测的采样时间为  $T_s$ , 则对单次检测而言, 平均模糊函数为

$$\begin{aligned} \overline{\chi(\tau, \xi)} &= \int_0^{T_s} E_d \frac{\sin(\pi N \tau / T)}{\sin(\pi \tau / T)} e^{-j\pi(N-1)\tau / T} e^{j2\pi \xi t} dt \\ &= E_d \frac{\sin(\pi N \tau / T)}{\sin(\pi \tau / T)} e^{-j\pi(N-1)\tau / T} \\ &\quad \cdot \frac{\sin[\pi \xi (T_s - |\tau|)]}{\pi \xi} e^{j\pi \xi (T_s - |\tau|)}, \quad |\tau| < T_s \end{aligned} \quad (11)$$

因此可得

$$\left| \overline{\chi(\tau, \xi)} \right| = E_d \left| \frac{\sin(\pi N \tau / T)}{\sin(\pi \tau / T)} \right| \left| \frac{\sin[\pi \xi (T_s - |\tau|)]}{\pi \xi} \right|, \quad |\tau| < T_s \quad (12)$$

$\left| \overline{\chi(\tau, \xi)} \right|$  沿  $\xi$  轴的切割为

$$\left| \overline{\chi(\tau, 0)} \right| = E_d \left| \frac{\sin(\pi N \tau / T)}{\sin(\pi \tau / T)} \right| (T_s - |\tau|) \quad (13)$$

式(13)实际上为 sinc 函数的形式, 其中心主瓣宽度为  $2/TN$ , 即中心主瓣宽度和 OFDM 符号周期  $T$  与子载波数  $N$  的商有关,  $T/N$  越小, OFDM 信号的时延分辨率越高。

$\left| \overline{\chi(\tau, \xi)} \right|$  沿  $\tau$  轴的切割为

$$\left| \overline{\chi(0, \xi)} \right| = E_d N T_s \left| \frac{\sin(\pi \xi T_s)}{\pi \xi T_s} \right| \quad (14)$$

由上式可以看出,  $\left| \overline{\chi(0, \xi)} \right|$  仍为 sinc 函数, 其中心主瓣宽度与采样时间  $T_s$  有关, 与子载波数  $N$  无关, 但其幅度与  $N$  有关, 子载波数越多  $\left| \overline{\chi(0, \xi)} \right|$  幅度越大。

#### 4 模拟仿真

假设一个 OFDM 符号周期  $T=72\mu\text{s}$ , 子载波数  $N=512$ , 采用 QPSK 调制方式, 调制符号  $d_k \in (1, -1, j, -j)$ 。如果采用内码编码率为 3/4 的编码方法, 这样每个子载波可以携带 1.5bit 的有用信息, 每个 OFDM 符号(共有 512 个子载波)可携带 768bit 的有用信息。由于符号周期  $T=72\mu\text{s}$ , 因此, 可算得该 OFDM 信号的子载波间隔为 13.9kHz, 净码率为 9.8Mbps, 带宽为 7.11MHz。仿真共采用了 3 个 OFDM 符号周期进行处理, 该 OFDM 信号的模糊函数参见图 4。

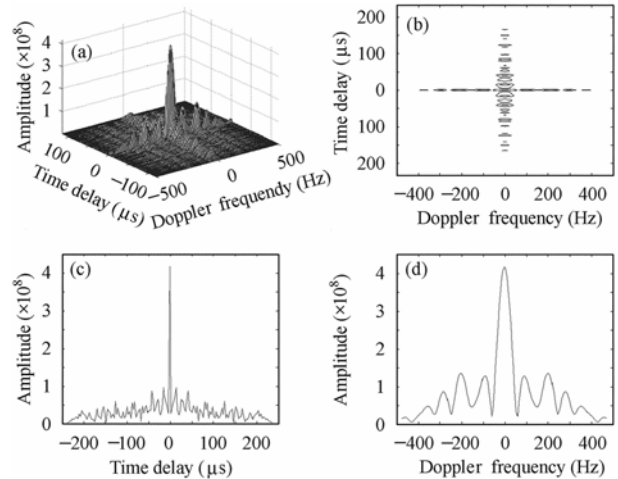


图 4 OFDM 信号模糊函数

(a) 立体图 (b) 等高线图 (c) 时延轴切面 (d) 频率轴切面

Fig.4 OFDM ambiguity function

(a) Three-dimensional plot (b) Contour plot  
(c) Time delay section plane (d) Doppler section plane

由图 4 看出, OFDM 信号的模糊函数具有良好的性能。

根据上面分析, 可以得出以该 OFDM 信号为非合作式照射源的双基雷达探测系统的时延分辨力理论上可达  $0.28\mu\text{s}$ 。如果采用 DVB-T 信号, 那么无论在 2K 模式(符号周期为  $224\mu\text{s}$ , 子载波数为 1705), 还是在 8K 模式(符号周期为  $896\mu\text{s}$ , 子载波数为 6817), 其时延分辨力理论上均为  $0.2628\mu\text{s}$ , 对应电磁波传播距离为 78.8m。

#### 5 结束语

本文以基于 OFDM 传输技术的数字地面电视广播信号为背景, 分析、讨论了 OFDM 信号的时域及频域特点, 并对 OFDM 信号的模糊函数做了详细的理论分析和仿真。为基于 OFDM 传输技术的数字地面电视信号为外辐射源的非合作式雷达系统在目标检测、参数估计和杂波抑制等方面提供了一定的理论参考。

#### 参考文献

- [1] William Y Zou, Wu Yiyan. COFDM: An overview. *IEEE Trans. on Broadcasting*, 1995, 41(1): 1-8.
- [2] 林茂庸, 柯又安. 雷达信号理论. 北京: 国防工业出版社, 1981, 第二章.
- [3] De Couasnon T, Monnier R, Rault J. OFDM for digital TV broadcasting. *Signal Processing*, 1994, 39(1-2): 1-32.
- [4] Schenk H O. A source of opportunity aided detecting and ranging design with direct broadcasting satellites, Proc.7rd IEEE Intl. Conference on Antennas and Propagation, York, Apr.1991, Part II: 612-615.

张颖辉: 男, 1970 年生, 高级工程师, 研究方向为通信与信息工程。

陶然: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为数字信号处理及在通信、雷达、数字化测量中的应用。

王越: 男, 1932 年生, 院士, 研究方向为系统科学、雷达系统。

周思永: 男, 1937 年生, 教授, 研究方向为信号处理、雷达系统。