

# 基于调频广播信号的动目标时差提取方法

黄知涛,姜文利,卢启中,周一宇

(国防科技大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘 要:** 本文分析了基于调频广播信号的固定目标时差提取方法(CCC 方法)的不足,提出了更一般化的动目标时差提取方法——扩展的 CCC(Extended CCC)方法. 仿真结果表明该方法比传统相关时差提取方法具有更强地抑制噪声的能力,这为基于调频广播信号的无源监视系统的工程实现提供了算法支持.

**关键词:** 调频广播信号; 动目标; 时差提取; 谱相关

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1597-04

## FM Signals-Based Time-Difference-of-Arrival Extraction of Moving Targets

HUANG Zhi-tao, JIANG Wen-li, LU Qi-zhong, ZHOU Yi-yu

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** Such kind of signal-selectivity algorithms in solving the problem of estimating time difference of arrival (TDOA) of radio waves, such as CCC method, has been developed to some extent by W. A. Gardner. But unfortunately, the methods mentioned above are not suitable for the cases when the echo signal from moving targets has nonzero Doppler shift, since the cycle frequency of echo signal varies with time. To solve the problem of estimating the TDOA of the FM signal with nonzero Doppler shift, a more generalized approach, which is referred to as the extended CCC (ECCC) method, is introduced in this paper. By utilizing the detection method of cell averaging constant false alarm rate (CA-CFAR), the estimates of TDOA and Doppler shift can thus be determined by the peak position over the two-dimensional space of TDOA and Doppler shift. In addition, it can be seen in this paper that the class of algorithms developed by W. A. Gardner is just a special case, corresponding to zero Doppler shifts. Computer simulations are also performed on the given method and simulation results have shown that the novel method works more efficiently in highly corruptive environment than the conventional correlation methods do.

**Key words:** FM signals; moving targets; time-difference-of-arrival extraction; spectral correlation

### 1 引言

利用调频广播信号对目标进行检测和定位中一个关键的问题是如何得到目标的时差信息. 由于发射源功率的限制, 调频广播信号在目标上形成的反射回波相对于进入接收机的杂波、多径干扰和噪声会很小, 这使得基于能量算子的信号检测和参数估计方法遇到了困难. 研究发现, 基于 FM 信号循环平稳性的信号处理方法能在极低信噪比条件下进行信号检测和参数估计.

William A. Gardner 最早开始这方面的研究, 他在 1987 年发表了关于调制信号循环平稳性分析的论文<sup>[4]</sup>, 并随后于 1992 年发表了基于信号循环平稳性的无源目标时差提取方法的论文<sup>[5]</sup>. 这两篇文章为基于调频广播信号的无源目标时差提取奠定了基础, 但其研究还存在两方面的不足, 一是其研究对象只局限于固定目标, 实际上由于多卜勒效应的影响, 使

得其提出的方法对动目标情况效果很差, 几乎无法使用; 另一个问题是其研究的前提必须要能够事先得到循环频率的准确值, 而这在实际工作环境中, 特别是在低信噪比条件下是很难做到的. 针对这两方面的不足, 本文结合传统相关时差提取方法<sup>[2,3]</sup>和 William A. Gardner 给出的基于谱相关的固定目标时差提取方法<sup>[5]</sup>, 提出了扩展的谱相关时差提取方法. 该方法不需要事先知道循环频率的准确值, 并且对固定目标和动目标情况都能使用.

限于篇幅, 本文将直接讨论时差提取方法, 有关调频广播信号的循环平稳性分析请参看文献<sup>[1,4]</sup>.

### 2 固定目标时差提取方法

考虑以一个调频广播发射台、一个接收站探测一个目标的情况. 为做到相干处理, 接收站采用双通道接收, 前端对应两个天线. 一个天线主瓣对准发射台, 相应接收通道用于接收

发射台辐射的广播信号,称为直达波通道;另一个天线主瓣指向目标,接收通道用于接收目标回波,称为信号通道.

发射站辐射的调频信号表示为  $s(t)$ ,

$$s(t) = \cos(2f_0 t + \phi(t)) \quad (1)$$

式中  $f_0$  为信号载频,  $\phi(t)$  为对应调制信号的调制分量. 于是,接收站接收的直达波信号  $x(t)$  和目标回波信号  $y(t)$  可分别表示如下,

$$x(t) \triangleq A s(t - D_1) + n(t) = A \cos(2f_0(t - D_1) + \phi(t - D_1)) + n(t) \quad (2)$$

$$y(t) \triangleq B s(t - D_2) + m(t) = B \cos(2f_0(t - D_2) + \phi(t - D_2)) + m(t) \quad (3)$$

其中,  $n(t)$ 、 $m(t)$  为噪声(包括杂波、多径干扰和通道噪声),并假设  $n(t)$ 、 $m(t)$ 、 $s(t)$  是互不相关的,  $A$  和  $B$  为信号衰减因子,  $D_1$  和  $D_2$  为直达波和反射回波在接收站的延迟.

分别计算  $x(t)$  的谱自相关和  $x(t)$  与  $y(t)$  的谱互相关,得到如下结果<sup>[1,6]</sup>

$$R_x(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t + \tau/2) x(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} dt$$

$$c(f) \triangleq R_x(f) \odot R_{xy}(f) = R_{xy}(f) (R_x(f - f_0))^* du = \begin{cases} A^3 B \operatorname{Re}\{e^{j2f_0} (1, -1)\} \odot \operatorname{Re}\{e^{j2f_0} (1, -1)\} / 4, & = 0 \\ A^3 B e^{j2f_0 D_0} (1, 1) \odot + D_0 (1, 1) / 16, & = 2f_0 \\ A^3 B e^{j2f_0 D_0} (1, 1) \odot + D_0 (1, 1) / 16, & = -2f_0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

“ $\odot$ 、 $*$ ”分别为相关算子和共轭算子. 当  $f = \pm 2f_0$  时,  $c(f)$  在  $|f| = D_0$  取得最大值,于是时差  $D_0$  的估计值  $\hat{D}_0$  可由下式得到

$$\hat{D}_0 = 0 | c(f_0) = \max c(f) \quad (8)$$

式(8)所示的时差提取方法即是 William A. Gardner 等人研究得到的 CCC(Cyclic Cross-Correlation method)方法.

### 3 动目标时差提取方法

设目标运动产生的多卜勒频率为  $f_d$  (在所关心的时间内近似为一常数),接收站接收到的回波信号  $y(t)$  变为

$$y(t) = B \cos(2(f_0 + f_d)(t - D_2) + \phi(t - D_2)) + m(t) \quad (9)$$

分别计算  $y(t)$  的谱自相关  $R_y(\tau)$  和  $y(t)$  与  $x(t)$  的谱互相关  $R_{xy}(\tau)$ , 得到

$$R_y(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(t + \tau/2) y(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} dt$$

$$= \begin{cases} B^2 \operatorname{Re}\{e^{j2(f_0 + f_d)} (1, -1)\} / 2, & = 0 \\ B^2 e^{-j4(f_0 + f_d) D_2} (1, 1) / 4, & = 2(f_0 + f_d) \\ B^2 e^{j4(f_0 + f_d) D_2} (1, 1) / 4, & = -2(f_0 + f_d) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t + \tau/2) y(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} dt$$

$$= \begin{cases} A B e^{-j2(f_0 + f_d)(D_1 + D_2) + f_d(D_2 + \tau/2)} + D_0 (1, 1) / 4, & = 2f_0 + f_d \\ A B e^{j2(f_0 + f_d)(D_1 + D_2) + f_d(D_2 + \tau/2)} + D_0 (1, 1) / 4, & = -(2f_0 + f_d) \\ A B e^{-j2(f_0 + f_d)(D_1 + D_2) + f_d(D_2 + \tau/2)} + D_0 (1, -1) / 4, & = f_d \\ A B e^{j2(f_0 + f_d)(D_1 + D_2) + f_d(D_2 + \tau/2)} + D_0 (1, -1) / 4, & = -f_d \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

$$= \begin{cases} A^2 \operatorname{Re}\{e^{j2f_0} (1, -1)\} / 2, & = 0 \\ A^2 e^{-j4f_0 D_1} (1, 1) / 4, & = 2f_0 \\ A^2 e^{j4f_0 D_1} (1, 1) / 4, & = -2f_0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t + \tau/2) y(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} dt$$

$$= \begin{cases} A B \operatorname{Re}\{e^{j2f_0} (1, -1)\} / 2, & = 0 \\ A B e^{-j2f_0(D_1 + D_2)} + D_0 (1, 1) / 4, & = 2f_0 \\ A B e^{j2f_0(D_1 + D_2)} + D_0 (1, 1), & = -2f_0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $D_0 = D_2 - D_1$  是目标相对于接收站和发射站的时差,  $T$  为观测时间,且

$$(w_1, w_2) \triangleq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e^{j(f_0 + f_d)(t + \tau/2) w_1 + f_d(t - \tau/2) w_2} dt \quad (6)$$

令

$$= \begin{cases} A^3 B \operatorname{Re}\{e^{j2f_0} (1, -1)\} \odot \operatorname{Re}\{e^{j2f_0} (1, -1)\} / 4, & = 0 \\ A^3 B e^{j2f_0 D_0} (1, 1) \odot + D_0 (1, 1) / 16, & = 2f_0 \\ A^3 B e^{j2f_0 D_0} (1, 1) \odot + D_0 (1, 1) / 16, & = -2f_0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

由上式可见,多卜勒效应使得回波信号循环频率发生了变化,当取  $f = 2f_0$  时,  $c(f) = 0$ , 直接用 CCC 方法(见式(8))估计时差显然会得到错误的结果. 如果能够根据多卜勒频率对直达信号进行循环频率补偿,使得补偿后的直达波循环频率与回波一致,那么就可以直接利用 CCC 方法进行目标时差估计了. 对调频信号而言,进行循环频率的补偿等价于对信号进行上变频处理,变频数值为  $f_d$ .

设上变频后的直达波信号为  $x'(t)$ , 于是有

$$x'(t) = A \cos(2(f_0 + f_d)t - 2f_0 D_1 + \phi(t - D_1)) + n(t) \quad (12)$$

其中

$$n(t) = \operatorname{Re}\{\tilde{n}(t) e^{j2f_d t}\} \quad (13)$$

$\tilde{n}(t)$  是  $n(t)$  的解析形式,  $\operatorname{Re}\{\cdot\}$  表示取信号实部.

分别计算  $x'(t)$  的谱自相关和  $x'(t)$  与  $y(t)$  的谱互相关,

$$R_{x'}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x'(t + \tau/2) x'(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} dt$$

$$= \begin{cases} A^2 \operatorname{Re}\{e^{j2(f_0 + f_d)} (1, -1)\} / 2, & = 0 \\ A^2 e^{-j4(f_0 + f_d) D_1} (1, 1) / 4, & = 2(f_0 + f_d) \\ A^2 e^{j4(f_0 + f_d) D_1} (1, 1) / 4, & = -2(f_0 + f_d) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (14)$$

$$R_{x'y}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x'(t + \tau/2) y(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} dt$$

$$= \begin{cases} A B \operatorname{Re}\{e^{j2(f_0 + f_d)} (1, -1)\} / 2, & = 0 \\ A B e^{-j2(f_0 + f_d)(D_1 + D_2) + f_d(D_2 + \tau/2)} + D_0 (1, 1) / 4, & = 2(f_0 + f_d) \\ A B e^{j2(f_0 + f_d)(D_1 + D_2) + f_d(D_2 + \tau/2)} + D_0 (1, 1), & = -2(f_0 + f_d) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

当  $\tau = \pm 2(f_0 + f_d)$  时,令

$$c(\tau) = R_x(\tau) \odot R_{xy}(\tau) \quad (16)$$

与式(8)一样,时差  $D_0$  的估计值  $\hat{D}_0$  可由下式得到

$$\hat{D}_0 = \arg \max_{\tau} |c(\tau)| \quad (17)$$

但实际上要得到多卜勒频率的准确值是很困难的,特别是在低输入信噪比条件下,可考虑进行如下改进.

设对直达波进行循环频率补偿的数值为  $f$ , 直达波信号  $x_f(t)$  可表示如下

$$x_f(t) \triangleq A \cos(2(f_0 + f)t - 2f_0 D_1 + \phi(t - D_1)) + n_f(t) \quad (18)$$

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_f(t + \tau/2) y(t - \tau/2) e^{-j2\pi f t} dt = \begin{cases} A^2 \text{Re} \{ (1, -1) e^{j2(f_0 + f)\tau/2} \} / 2, & \tau = 0 \\ A^2 e^{-j4\pi f_0 D_1} (1, 1) / 4, & \tau = 2(f_0 + f) \\ A^2 e^{j4\pi f_0 D_1} (1, 1) / 4, & \tau = -2(f_0 + f) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{当 } \tau = 2(f_0 + f), \tau = 2f_0 + f_d + f \text{ 时,令} \\ c(f, \tau) \triangleq R_{xy}(\tau) \odot R_{xy}(\tau) \quad (22)$$

化简后得

$$c(f, \tau) = \frac{A^3 B}{16} e^{-j2\pi f_0 D_1 - (f_0 + f_d) D_2} \int_{-\infty}^{\infty} (1, 1) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(f - f_d)t} dt \quad (23)$$

或进一步

$$|c(f, \tau)| = \frac{A^3 B}{16} \left| \int_{-\infty}^{\infty} (1, 1) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j(f - f_d)t} dt \right| \quad (24)$$

上式在  $\tau = -D_0, f = f_d$  时取得最大值,这说明  $|c(f, \tau)|$  可以作为时差估计的一个统计量,具体的做法如下:让参数  $f$  在一个可能的区间内连续变化,并连续给出  $|c(f, \tau)|$  在不同时延

的值,当在某个  $f_i, \tau_i$  使得  $|c(f_i, \tau_i)|$  取得最大值时,  $\tau_i$  即是所要估计的时差,  $f_i$  对应目标的多卜勒频率.也就是

$$D_0 = -\tau_i \mid |c(f_i, \tau_i)| = \max_{f, \tau} |c(f, \tau)| \quad (25)$$

当取  $\tau = -2(f_0 + f), \tau = -(2f_0 + f_d + f)$  时会得到相同的结论,限于篇幅在此不再赘述.

式(25)给出的时差提取方法文章称为扩展的谱相关方法(Extended Cycle Cross-Correlation method 简称 ECCC 方法).显然,式(25)对固定目标仍能使用,所不同的是最大值出现在  $f_i = 0$  处.

#### 4 仿真分析

仿真中调频信号载频为 90MHz;声音调制信号采用 Windows\media 下的 Chimes.wav,最大调制频偏为 22.5kHz.设目标运动产生的多卜勒频率(相对于发射站和接收站)为 100Hz,采样率取为 66.15kHz(这个采样率主要是为了与 Chimes.wav 的采样率相一致,相应的采样间隔  $T = 1.5117 \times 10^{-5}$ 秒);目标相对于发射站和接收站的时差为  $D_0 = 5T = 7.5586 \times 10^{-5}$ 秒;仿真所利用的数据时间长度为 0.23 秒,共 15000 个数据点.

仿真分三个部分,第一部分考虑直达波通道中直达波功率与噪声功率比对时差提取的影响;第二部分检验 ECCC 方

其中

$$n_f(t) = \text{Re} \{ \tilde{n}(t) e^{j2\pi f t} \} \quad (19)$$

$\tilde{n}(t)$  是  $n(t)$  的解析形式,  $\text{Re} \{ \cdot \}$  表示取信号实部.

计算  $x_f(t)$  的谱自相关和  $x_f(t)$  与  $y(t)$  的谱互相关,得到

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_f(t + \tau/2) y(t - \tau/2) e^{-j2\pi f t} dt = \begin{cases} A^2 \text{Re} \{ (1, -1) e^{j2(f_0 + f)\tau/2} \} / 2, & \tau = 0 \\ A^2 e^{-j4\pi f_0 D_1} (1, 1) / 4, & \tau = 2(f_0 + f) \\ A^2 e^{j4\pi f_0 D_1} (1, 1) / 4, & \tau = -2(f_0 + f) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} A B e^{j2\pi f_0 D_1 - (f_0 + f_d)(\tau/2 + D_2)} + D_0(1, 1) / 4, & \tau = 2f_0 + f_d + f \\ A B e^{-j2\pi f_0 D_1 - (f_0 + f_d)(\tau/2 + D_2)} + D_0(1, 1) / 4, & \tau = -(2f_0 + f_d + f) \\ A B e^{j2\pi f_0 D_1 - (f_0 + f_d)(\tau/2 + D_2)} + D_0(1, -1) / 4, & \tau = f - f_d \\ A B e^{-j2\pi f_0 D_1 - (f_0 + f_d)(\tau/2 + D_2)} + D_0(1, -1) / 4, & \tau = f_d - f \end{cases} \quad (21)$$

其它

法在低信噪比条件下的性能;第三部分比较 ECCC 方法与传统相关时差提取方法的性能.传统相关时差提取方法的计算式为

$$c(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau/2) y(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (26)$$

第一种情况,设定信号通道中噪声功率比目标回波功率强 20dB,分别考虑直达波通道中直达波功率比噪声强 16dB、26dB 的情况,仿真实验结果分别如图 1(a)、(b)所示.图中  $y$  轴为延迟值(单位:秒), $x$  轴为频率(单位:Hz),纵轴为 ECCC 函数的幅度,以下同.可见,直达波通道中时差提取

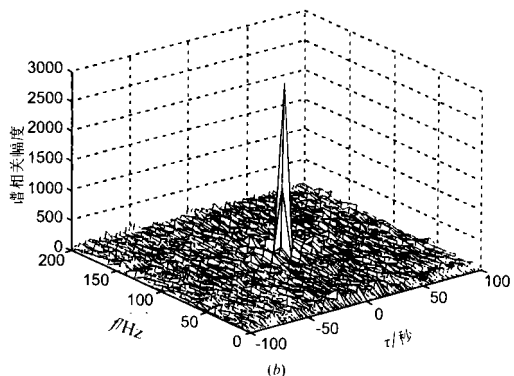
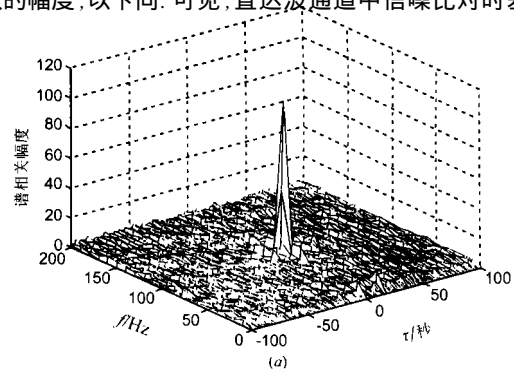


图1 直达波通道信噪比对时差估计的影响.

(a) 信噪比为 16dB; (b) 信噪比为 26dB

性能影响并不大.在现实条件下,直达波通道中直达波功率典型值会比噪声强 30dB 左右.在下面的仿真中,设定直达波功率比噪声强 26dB.

第二种情况,考虑信号通道中回波功率与噪声功率比分别为 -30dB、-40dB 时对时差提取的影响,仿真结果见图 2 (a)、(b)所示.由仿真结果可见,在信噪比为 -40dB 时,ECCC 方法仍能给出准确的时差估计值,说明该方法具有很好地抑制噪声的能力.

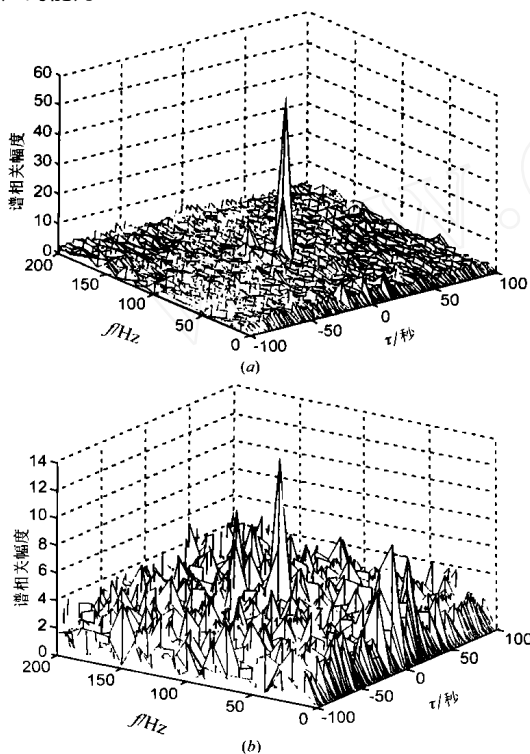


图2 回波通道信噪比对时差估计的影响  
(a) 信噪比为 -30dB; (b) 信噪比为 -40dB

第三部分,信号通道中回波功率与噪声功率比为 -30dB 时,传统相关方法与 ECCC 方法仿真结果分别如图 3. 比较图 3 和图 2 (a) 可见,传统相关方法在该信噪比条件下已不能得到时差信息,而 ECCC 方法仍能得到准确的时差值,说明了 ECCC 方法具有更强的抗噪性能.

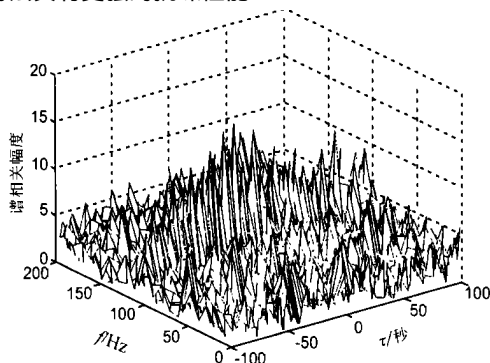


图3 模糊函数方法计算结果,回波通道信噪比为 -30dB

## 5 结束语

文章主要研究了基于调频广播信号的动目标时差提取方法,得到了比 William A. Gardner 等人给出的 CCC 方法更为一般化、使用面更广的 ECCC 方法.仿真结果表明,ECCC 方法同传统的相关方法相比具有更强地抑制噪声的能力.进一步的工作将考虑如何减少算法的计算量,使之能达到工程应用的要求.

## 参考文献:

- [1] 张贤达,保铮.非平稳信号分析与处理 [M]. 北京:国防工业出版社,1999:324 - 352.
- [2] 张贤达.现代信号处理 [M]. 北京:清华大学出版社,1998:434 - 438.
- [3] 伯晓晨,李涛,刘路.Matlab 工具箱应用指南-信息工程篇 [M]. 北京:电子工业出版社,2000:1 - 100.
- [4] William A Gardner. Spectral correlation of modulated signals: Part I- analog modulation [J]. IEEE Trans. Commun., 1987, 35 (6): 584 - 594.
- [5] William A Gardner, et al. Signal-selective time-difference-of-arrival estimation for passive location of man-made signal sources in highly corruptive environments, Part I: theory and method [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1992, 40 (5): 1168 - 1184.
- [6] William A Gardner. Measurement of spectral correlation [J]. IEEE Trans. ASSP, 1986, 34 (5): 1111 - 1123.

## 作者简介:



黄知涛 男. 1976 年 9 月生于湖北荆州. 博士研究生. 发表论文 10 余篇, 研究方向为: 雷达信号处理、雷达数据处理及无源探测、定位理论与技术等.



姜文利 男. 1967 年 5 月生于山东烟台. 博士, 副教授, 已发表论文 30 余篇, 研究方向为: 信号处理、综合电子战等.