

空分天线风场测量中三角尺寸效应的抑制^{*}

舒卫平 赵正予

(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

摘要 利用空分天线方法进行风场测量时存在着三角尺寸效应，以往公认的产生原因包括电子噪声干扰、地杂波等因素。本文首先提出另外一种产生三角尺寸效应的可能原因，即大气非平稳性和不均匀性（可统称为大气非平稳性），并讨论了由于此原因对大气风场测量的影响和作用以及产生三角尺寸效应的具体机制。在此基础上提出了一种用来消除大气的非平稳性影响的方法，即增量累积量法。用增量累积量方法的特例（2阶零延迟增量累积量）得出一维平均速度的表达式。理论分析表明利用该方法还可以有效地去除地杂波效应；高阶($k \geq 3$)情况，增量累积量还可以抑制高斯噪声。分别在非平稳大气情况和有地杂波情况下，对空分天线方法中的全相关分析算法和增量累积量法进行数值模拟对比，得出结论：随着天线间距的变化，增量累积量法实测平均风场水平速度与模型输入速度的偏差比全相关分析算法要小得多。

关键词 风场测量；三角尺寸效应

中图法分类号 P 353

The Suppression of Triangle Size Effect in Spaced Antenna Wind Measurements

SHU Weiping ZHAO Zhengyu

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079)

Abstract There is the Triangle Size Effect (TSE) in wind measurements with Spaced Antenna (SA) method due to electronic noise and ground clutters etc. Another possible cause (non-stationary of atmosphere) of TSE and the mechanism of its effect to wind measurements was discussed in this paper. The work also presents Increment's Cumulant Approach (ICA) to eliminate the non-stationary of atmosphere and ground clutter based on the analysis of the causes of TSE; the analytical expression of one dimension mean velocity can also be obtained by the special case of Increment's Cumulant Approach (the 2nd order zero-lags ICA). In addition the high order ($k \geq 3$) cumulant of increment are proposed to suppress Gaussian noise. The comparisons between FCA and ICA with non-stationary and ground clutter by numerical simulations show that the measurement errors of ICA are much less than those of FCA by comparing mean horizontal velocities (output of simulations) and input velocities of mode.

Key words Wind measurements, Triangle size effect

* 国家自然科学基金资助项目 (40474066)

2005-09-21 收到原稿, 2006-04-23 收到修定稿

1 引言

空分天线方法 (SA) 是雷达测量大气的一种通常方法, 其利用三组或三组以上空间分离的天线竖直向上发射和接收^[1], 通过对接收信号进行全相关分析 (FCA) 或全谱分析 (FSA)^{[1]~[3]} 得出风场参数。实际测量中发现, 风场参数随着三组空分天线组之间的间距改变而变化, 呈现一种不稳定性, 即为三角尺寸效应 (TSE)^[4]。TSE 给风场测量带来了很大误差, 导致测量风速与真实风速的差异。以前的研究往往从一个角度分析引起 TSE 的原因^[5], 如随机噪声、地杂波等, 提出了一些抑制 TSE 的方法, 但在有些情况下效果并不很明显。

在以往的研究基础上, 本文提出可能引起 TSE 的另外一种新机制, 即大气的非平稳性的影响和作用。在讨论大气非平稳性对 TSE 的作用和影响的基础上, 结合以往的机制, 讨论了抑制消除大气的非平稳性、地杂波和高斯随机噪声影响的方法, 即增量累积量方法 (ICA)。

数值模拟是检验理论成果比较直接、有效和经济的手段。文章最后数值模拟了 ICA 方法抑制大气非平稳性和地杂波影响的情况。

2 大气非平稳性对 TSE 的影响

Golley^[4] 第一次对 TSE 做了详尽的描述, 提出系统数据处理中的数字化效应是产生 TSE 的可能原因; Meek^[5] 等人通过对实际数据的分析认为接收数据的噪声 (包括地杂波、电子噪声等) 会随着天线间距的改变对测量的水平速度产生程度不同的影响, 有可能是 TSE 的主要原因, Van Baelen^[6] 通过仿真数据得出了同样的结果。Fedor^[7] 等人认为接收天线组之间的耦合可能产生 TSE。一般来说接收天线组之间耦合是比较小的, 所以耦合因素也是很小的。

除了上述研究和讨论外, 实际中由于大尺度大气运动的存在, 使测量中接收信号不再具有平稳性^[8]。由 FCA^[2] 和 FSA^[3] 标准过程可知, 接收信号间的自、互相关函数被用来计算风场参数, 有

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{r}, \mathbf{r}, t, t + \tau) &= E[e(\mathbf{r}, t)e(\mathbf{r}, t + \tau)], \\ \rho(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, t, \tau) &= \\ E[e(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, t)e(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, t + \tau)], \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, t, t + \tau) &= \\ E[e(\mathbf{r}, t)e(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, t + \tau)]. \end{aligned} \quad (2)$$

上两式中, \mathbf{r} 和 $\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}$ 分别为求取互相关接收天线空间位置矢量, E 表示集合平均。

定量地讨论一维情况, 一维情况只是实际二维情况在竖直平面内的投影, 所以在研究问题时具有代表性。

先假设地面上有两组接收天线 1 和 2, 它们之间的距离为 ξ_0 。在通过这两组天线的竖直平面上研究一维水平风的平均测量风速同 ξ_0 的关系。大气散射衍射图样因为水平风的原因以速度 v 沿着天线 1 和天线 2 的连线运动。这时假设在天线 1 和天线 2 的连线方向上大气风场空间是不均匀的, 时间上是不平稳的。

在此种天线设置下来看一下典型的 FCA^[2] 过程求解中水平风速设置下的尺寸效应 (FCA 方法默认为平稳过程, 实际上已是非平稳非均匀过程)。

假设两天线固定在散射体图样相对速度为 0 的运动坐标系上, 平稳情况此时空相关函数为^[2]

$$\rho(\xi', \tau) = f\left(\frac{\xi'^2}{d^2} + \frac{\tau^2}{b^2}\right). \quad (3)$$

其中, ξ' 为运动坐标系水平坐标, 表示取相关的两路信号天线位置或空间取样位置之差; d 和 b 表示散射体的空间和时间尺度; f 表示函数, 小括号中为 f 的变量。在空间非均匀, 时间非平稳情况下 (3) 式可以修改为

$$\begin{aligned} \rho(r'_1, r'_1 + \xi', t, t + \tau) &= \\ f\left[\frac{\xi'^2}{d^2(r'_1, r'_1 + \xi')} + \frac{\tau^2}{b^2(t, t + \tau)}\right] &= \\ f\left[\frac{\xi'^2}{d^2(r'_1, \xi')} + \frac{\tau^2}{b^2(t, \tau)}\right]. \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $r'_1, r'_1 + \xi'$ 为运动坐标系中天线 1 和天线 2 的空间位置坐标; $d = d(r'_1, r'_1 + \xi')$ 意味着空间尺度是天线空间位置的函数; $b = b(t, t + \tau)$ 意味着时间尺度是时刻点的函数。如果天线不是固定在运动坐标系中, 而是固定在地面上, 坐标系转换公式为

$$r_1 = r'_1 + \overline{v(r_1)} \times t,$$

或 $r_1 = r'_1 + E[v(r_1)] \times t.$

$$r_2 = r'_2 + \overline{v(r_2)} \times (t + \tau),$$

或 $r_2 = r'_2 + E[v(r_2)] \times (t + \tau)$. (5)

其中, r_1, r_2 为静止坐标系中空间坐标, 这些坐标都是时间的函数, 即

$$\begin{aligned} r_1 &= r_1(t), \quad r'_1 = r'_1(t), \\ r_2 &= r_2(t + \tau), \quad r'_2 = r'_2(t + \tau). \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)中 $\bar{v}(r_1)$ 和 $E[v(r_1)]$ 以 r_1 为中心的空间邻域中速度采样的集合平均 (两种表示是因为目前有这两种主流表示方法), 此时 $\bar{v}(r_1)$ 是空间位置 r_1 的函数; $\bar{v}(r_2)$ 的含义相同.

已知 $\xi = r_2 - r_1$, $\xi' = r'_2 - r'_1$, 式(5)中两式相减得到

$$\xi = \xi' + [\bar{v}(r_2) - \bar{v}(r_1)] \times t + \bar{v}(r_2)\tau. \quad (7)$$

则

$$\begin{aligned} \rho(r_1, r_1 + \xi, t, t + \tau) &= \\ f\left\{\left[\frac{\xi - [\bar{v}(r_1 + \xi) - \bar{v}(r_1)]t - \bar{v}(r_1 + \xi)\tau}{d(r_1 - \bar{v}(r_1)t, r_1 - \bar{v}(r_1)t + \xi - \bar{v}(r_1 + \xi)\tau)}\right]^2 + \right. \\ &\quad \left.\frac{\tau^2}{b^2(t, t + \tau)}\right\} = \\ f\left\{\left[\frac{\xi - \bar{v}(r_1 + \xi) - \bar{v}(r_1)]t - \bar{v}(r_1 + \xi)\tau}{d(r_1, \xi, t, \tau)}\right]^2 + \right. \\ &\quad \left.\frac{\tau^2}{b^2(t, \tau)}\right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

取 $\xi = 0$, 天线 1 的自相关函数为

$$\begin{aligned} \rho(r_1, r_1, t, t + \tau) &= \\ f\left\{\left[\frac{\bar{v}(r_1)\tau}{d(r_1, 0, t, \tau)}\right]^2 + \frac{\tau^2}{b^2(t, \tau)}\right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

天线 1 和天线 2 之间的互相关函数为

$$\begin{aligned} \rho(r_1, r_1 + \xi_0, t, t + \tau) &= \\ f\left\{\left[\frac{\xi_0 - [\bar{v}(r_1 + \xi_0) - \bar{v}(r_1)] \times t - \bar{v}(r_1 + \xi_0)\tau}{d(r_1, \xi_0, t, \tau)}\right]^2 + \right. \\ &\quad \left.\frac{\tau^2}{b^2(t, \tau)}\right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

对于标准的 FCA 过程, 默认为空间均匀, 时间平稳, 认为自相关函数和互相关函数都只是时间空间偏置的函数, 取自相关函数和互相关函数曲线的交点值作为联系两个函数的纽带.

令式(9)和式(10)相等, 此时

$$\tau = \tau_e = \frac{\xi_0 - [\bar{v}(r_1 + \xi_0) - \bar{v}(r_1)] \times t}{d(r_1, \xi_0, t, \tau)} \times \bar{v}(r_1) + \bar{v}(r_1 + \xi_0). \quad (11)$$

所谓的 FCA “真实速度 (平均)” 为 [2]

$$\begin{aligned} v_{\text{true}} &= \xi_0 / (2\tau_e) \\ &= \frac{d(r_1, \xi_0, t, \tau)}{d(r_1, 0, t, \tau)} \times \bar{v}(r_1) + \bar{v}(r_1 + \xi_0) \\ &= \frac{2 - [\bar{v}(r_1 + \xi_0) - \bar{v}(r_1)] \times 2t / \xi_0}{2 - [\bar{v}(r_1 + \xi_0) - \bar{v}(r_1)] \times 2t / \xi_0}. \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可以看到大气非平稳性带来以下影响, 空间的不均匀直接导致了 FCA 算法中所测速度与天线之间的间距 ξ_0 有关, 即 TSE; 如果大气是平稳均匀的, 则式(4)~(12)中的空间尺度 d, b 为常数, 且平均速度不再是空间位置和时刻点的函数, 而是一常量, 即, $\bar{v}(r_1 + \xi_0) = \bar{v}(r_1) = \bar{v}$, 此时式(12)中 $v_{\text{true}} = \xi_0 / (2\tau_e) = \bar{v}$, 没有 TSE.

3 抑制 TSE 的理论分析和计算

3.1 ICA 原理以及消除大气的非平稳性影响

大气湍流中有一个空时函数 $f(\mathbf{r}, t)$, 在长的时间间隔和大的空间尺度内, 它是非平稳的. 增量函数可表示如下:

$$\phi_{\Delta\mathbf{r}, \tau}(\mathbf{r}, t) = f(\mathbf{r}, t) - f(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, t + \tau). \quad (13)$$

在 $\Delta\mathbf{r}, \tau$ 不是很大时, 可以认为是平稳的, 即 $f(\mathbf{r}, t)$ 是一次增量平稳的. 这里 $\Delta\mathbf{r}$ 中, τ 是空间、时间增量, 仅为参变量. 增量函数的 k 阶累积量工程化定义为

$$\begin{aligned} C_{k, \phi}(\Delta\hat{\mathbf{r}}_1, \Delta\hat{\mathbf{r}}_2, \dots, \Delta\hat{\mathbf{r}}_{k-1}; \hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2, \dots, \hat{\tau}_{k-1}) &= \\ E[\phi_{\tau, \Delta\mathbf{r}}(\mathbf{r}, t)\phi_{\tau, \Delta\mathbf{r}}(\mathbf{r} + \Delta\hat{\mathbf{r}}_1, t + \hat{\tau}_1)\phi_{\tau, \Delta\mathbf{r}} & \\ (\mathbf{r} + \Delta\hat{\mathbf{r}}_2, t + \hat{\tau}_2) \dots \phi_{\tau, \Delta\mathbf{r}}(\mathbf{r} + \Delta\hat{\mathbf{r}}_{k-1}, t + \hat{\tau}_{k-1})] - \\ E[g(\mathbf{r}, t)g(\mathbf{r} + \Delta\hat{\mathbf{r}}_1, t + \hat{\tau}_1)g(\mathbf{r} + \Delta\hat{\mathbf{r}}_2, t + \hat{\tau}_2) \dots & \\ g(\mathbf{r} + \Delta\hat{\mathbf{r}}_{k-1}, t + \hat{\tau}_{k-1})]. \end{aligned} \quad (14)$$

E 表示集合平均; $g(\mathbf{r}, t)$ 为与 $\phi_{\tau, \Delta\mathbf{r}}(\mathbf{r}, t)$ 相同谱密度的高斯过程. $\Delta\hat{\mathbf{r}}_1, \Delta\hat{\mathbf{r}}_2, \dots, \Delta\hat{\mathbf{r}}_{k-1}, \hat{\tau}_1, \hat{\tau}_2, \dots, \hat{\tau}_{k-1}$ 也是空间和时间增量, 符号 \wedge 是为了避免同增量 $\phi_{\tau, \Delta\mathbf{r}}(\mathbf{r}, t)$ 中的 $\Delta\mathbf{r}, \tau$ 发生混淆而标出的, 因为在式(13)中, $\Delta\mathbf{r}, \tau$ 只是参变量.

式(14)等号的左边可以从接收信号中得到, 等号的右边可转化为大气参数简单函数形式, 从而可以算得大气参量. 式(14) k 阶累积量表示式带来了大

量的信息, 但也十分复杂. 当计算常用的参量, 如水平速度、湍流速度的 2 阶矩和 4 阶矩时, 可取累积量的零延迟切片 ($\Delta\hat{r}_i = 0, \hat{r}_i = 0, i = 1, 2, \dots, k - 1$), 有

$$\begin{aligned} C'_{k,\phi} &= C_{k,\phi}(0, 0, \dots, 0; 0, 0, \dots, 0) = \\ &E[\phi_{\tau, \Delta r}^k(\mathbf{r}, t)] - E[g^k(\mathbf{r}, t)]. \end{aligned} \quad (15)$$

(15) 式等号右边退化为 $f(\mathbf{r}, t)$ 的结构函数的组合.

对于零均值的过程 (一个非零均值过程总可以通过减去均值变成零均值), 用矩和累积量的转化公式, 列出 2~4 阶零延迟累积量表达式:

$$\begin{aligned} C'_{2,\phi} &= E\{\phi_{\tau, \Delta r}^2(\mathbf{r}, t)\}, \quad C'_{3,\phi} = E\{\phi_{\tau, \Delta r}^3(\mathbf{r}, t)\}, \\ C'_{4,\phi} &= E\{\phi_{\tau, \Delta r}^4(\mathbf{r}, t)\} - 3E^2\{\phi_{\tau, \Delta r}^2(\mathbf{r}, t)\}. \end{aligned} \quad (16)$$

从以上三式可以得出结论: (1) $k \leq 3$ 时, 零均值过程累积量同矩相等; (2) 增量过程的累积量恰好为 Kolmogorov 定义的 k 阶结构函数 ($k \leq 3$) 或结构函数的组合 ($k \geq 4$). 从第 (2) 点可知, 本文的方法已经包含 Praskovsky^[9] 的结构函数方法, 他的方法只是累积量方法的特例.

下面简单介绍 2 阶零延迟增量累积量求取平均水平风速的方法 (2 阶结构函数方法).

$$D_2(\tau, \Delta r) = C'_{2,\phi} = E\{[f(\mathbf{r}, t) - f(\mathbf{r} + \Delta r, t + \tau)]^2\}. \quad (17)$$

式 (17) 中 $D_2(\tau, \Delta r)$ 即为定义的 2 阶结构函数.

定义归一化结构函数为

$$\begin{aligned} D'_2(\tau, \Delta r) &= \\ &D_2(\tau, \Delta r) / E\{[f(\mathbf{r}, t) - E(f(\mathbf{r}, t))]^2\}. \end{aligned} \quad (18)$$

按照结构函数方法, 可以把归一化的结构函数展开为 τ 的泰勒级数:

$$\begin{aligned} D'_2(\tau, \Delta r) &= a_2(\Delta r) + b_2(\Delta r)(\tau/\delta t) + \\ &c_2(\Delta r)(\tau/\delta t)^2 + o(\tau^3), \\ D'_{2,\text{auto}}(\tau, 0) &= d_{2,\text{auto}}(0)(\tau/\delta t)^2 + o(\tau^3), \\ |\tau| &\ll 1. \end{aligned} \quad (19)$$

式 (19) 中 δt 为采样时间, $o(\tau^3)$ 表示 τ 的 3 阶小量; $a_2(\Delta r), b_2(\Delta r), c_2(\Delta r)$ 为互结构函数泰勒级数 0 阶, 1 阶, 2 阶系数; $d_{2,\text{auto}}(0)$ 为自结构函数泰勒级数 2 阶系数. 此时可取 $\tau = -2\delta t, -\delta t, \delta t, 2\delta t$ 对

应结构函数值来确定系数 $a_2(\Delta r), b_2(\Delta r), c_2(\Delta r), d_{2,\text{auto}}(0)$. 当 τ 的取值个数比系数个数多时, 形成超定方程组, 可用最小二乘法解之.

假设两部天线 1, 2, 它们之间的距离为 $\Delta r = |\Delta \mathbf{r}|$, 如果天线 1, 2 接收信号的 2 阶互结构函数展开泰勒级数, 0, 1 阶系数分别求得为 $a_2(\Delta r), b_2(\Delta r)$. 根据文献 [9] 的推导, 系数表达式结果为

$$\begin{aligned} a_2(\Delta r) &= 2 \left[1 - \exp \left(-\frac{4\pi^2\gamma^2\Delta r^2}{\alpha^2 D^2} \right) \right], \\ b_2(\Delta r) &= -\frac{32\pi^2\gamma^2\Delta r}{\alpha^2 D} \frac{E(V_{12})\delta t}{D} \\ &\exp \left(-\frac{4\pi^2\gamma^2\Delta r^2}{\alpha^2 D^2} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

式 (20) 中 $\gamma \approx 0.5$ 为与雷达有关的常数, α^2 为表示发射波束宽度和接收波束宽度之间关系的常数, D 表示天线口径. 沿着天线连线的平均水平速度为

$$\begin{aligned} E(V_{12}) &= b_2(\Delta r) \cdot \Delta r / \{[1 - a_2(\Delta r)/2] \cdot \\ &\ln[1 - a_2(\Delta r)/2] \cdot 8\delta t\}. \end{aligned} \quad (21)$$

从本节开头描述可知, 增量方法已经将非平稳随机过程转化为平稳随机过程. 由于信号非平稳性引起的误差可以消除, 在求平均速度的过程中, 一直就是求取的集合平均, 所以由于大气非平稳、非均匀引起的误差可以在理论上消除.

3.2 消除高斯噪声效应

下面来考虑增量累积量法对于信号中高斯噪声的影响. 设有一个带有零均值高斯噪声 (白色或有色) $n(\mathbf{r}, t)$ 的零均值信号, 有

$$\tilde{s}(\mathbf{r}, t) = s(\mathbf{r}, t) + n(\mathbf{r}, t). \quad (22)$$

增量函数可表示为

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_{\tau, \Delta r}(\mathbf{r}, t) &= \tilde{s}(\mathbf{r}, t) - \tilde{s}(\mathbf{r} + \Delta r, t + \tau) = \\ &\phi_{\tau, \Delta r}(\mathbf{r}, t) + \Delta n(\mathbf{r}, t). \end{aligned} \quad (23)$$

其中,

$$\begin{aligned} \phi_{\tau, \Delta r}(\mathbf{r}, t) &= s(\mathbf{r}, t) - s(\mathbf{r} + \Delta r, t + \tau), \\ \Delta n(\mathbf{r}, t) &= n(\mathbf{r}, t) - n(\mathbf{r} + \Delta r, t + \tau). \end{aligned} \quad (24)$$

简记 $\tilde{\phi}_{\tau, \Delta r}(\mathbf{r}, t)$ 的累积量为 $\text{cum}[\tilde{\phi}_{\tau, \Delta r}(\mathbf{r}, t)]$. 根据累积量的性质, $\tilde{\phi}_{\tau, \Delta r}(\mathbf{r}, t)$ 和 $\Delta n(\mathbf{r}, t)$ 是两个统计独立的随机过程, 它们和的随机过程等于随机过程的和, 即

$$\text{cum}[\tilde{\phi}_{\tau, \Delta r}(\mathbf{r}, t)] =$$

$$\text{cum}[\phi_{\tau, \Delta r}(\mathbf{r}, t)] + \text{cum}[\Delta n(\mathbf{r}, t)]. \quad (25)$$

按照随机过程的性质, 高斯过程的差 $\Delta n(\mathbf{r}, t)$ 是高斯过程。由累积量的性质, 零均值高斯随机过程的高阶累积量 ($k \geq 3$) 恒为零。即式(25)等号右边第二项为零 ($k \geq 3$), 可知 $\tilde{\phi}_{\tau, \Delta r}(\mathbf{r}, t)$ 的高阶 ($k \geq 3$) 累积量可以消除 $\Delta n(\mathbf{r}, t)$ 的影响。

3.3 抑制地杂波效应

假设接收机接收到的功率信号为

$$S'(\mathbf{r}, t) = S(\mathbf{r}, t) + c(\mathbf{r}, t). \quad (26)$$

其中, $S(\mathbf{r}, t)$ 是没有地杂波干扰的纯功率信号, 均值为 0; $c(\mathbf{r}, t)$ 是地杂波信号, 具有大的相关延迟, 均值为 0, 满足^[9]

$$E[S^i(\mathbf{r}, t)c^j(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)] = 0, \quad (27)$$

$$E[c^i(\mathbf{r}, t)] = E[c^i(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)], \quad (28)$$

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{E[c^i(\mathbf{r}, t)c^j(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)]}{\sqrt{E[c^{2i}(\mathbf{r}, t)]E[c^{2j}(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)]}} = 1$$

(Δr 较小)

$$(i = 0, 1, 2, \dots; j = 0, 1, 2, \dots). \quad (29)$$

以上关系式在 $\Delta \mathbf{r} = 0$ 时也成立。

利用式(27)可得

$$\begin{aligned} E\{[S'(\mathbf{r}, t) - S'(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)]^k\} &= \\ E\{[S(\mathbf{r}, t) - S(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)]^k\} + \\ E\{[c(\mathbf{r}, t) - c(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)]^k\}. \end{aligned} \quad (30)$$

当 $k = 2$ 时, 利用式(28), (29), 可将式(30)中等号右边第二项变为

$$\begin{aligned} E\{[c(\mathbf{r}, t) - c(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)]^2\} &= \\ = E\{[c^2(\mathbf{r}, t) - 2c(\mathbf{r}, t)c(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau) + \\ c^2(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)]\} &= \\ = E[c^2(\mathbf{r}, t)] + E[c^2(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)] - \\ 2E[c(\mathbf{r}, t)c(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)] &= \\ = 2E[c^2(\mathbf{r}, t)] - 2\sqrt{E[c^2(\mathbf{r}, t)]E[c^2(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)]} &= \\ = 2E[c^2(\mathbf{r}, t)] - 2\sqrt{E[c^2(\mathbf{r}, t)]E[c^2(\mathbf{r}, t)]} &= 0. \end{aligned} \quad (31)$$

当 $k = 3$ 时也有同样的结果。

利用(31)式的关系可求得零延迟的 $k = 2, 3$ 阶增量累积量为

$$\begin{aligned} E\{[S'(\mathbf{r}, t) - S'(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)]^k\} &= \\ E\{[S(\mathbf{r}, t) - S(\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}, t + \tau)]^k\}. \end{aligned} \quad (32)$$

即地杂波的影响被消除了。

3.4 ICA 的讨论

ICA 适用最重要的条件就是要保证式(13)中增量过程 $\phi_{\Delta r, \tau}(\mathbf{r}, t)$ 是近似平稳的, 这取决于以下两个方面。

(1) 时间增量 τ 必须尽可能小, 以满足增量平稳的定义要求和式(19)泰勒展开的数学精度。对于 τ 的要求其实就是要求抽样时间 δt 在满足雷达系统要求的条件下尽可能小。

(2) 空间增量 $\Delta \mathbf{r}$ 的要求比时间增量要复杂。一方面要求 $\Delta \mathbf{r}$ 不能太大以满足定义要求, 但是它的要求没有 τ 强, 因为没有泰勒展开的要求; 另一方面, 从误差角度上考虑, 两个十分相近的数值相减带来较大的误差, 要求 $\Delta \mathbf{r}$ 不能太小, 避免天线之间信号区分太小。综合考虑, 可以根据实际情况选择一个合适的值。

前几节已经充分阐述了 ICA 在抑制三角尺寸方面的优势, 但是当 ICA 逐渐偏离它的适用条件时, 误差会逐渐加大。

4 抑制三角尺寸效应数值模拟

4.1 仿真模型

在进行数值模拟时, 有两类模型可以选择, 一类是以 Muschinski^[10]为代表的模型, 十分贴近实际也非常复杂; 另一类是 Holdswath^[11]的模型, 简单实用, 适用大部分实际情况, 比较适合对理论结果进行论证型仿真。该模型已经与许多实际雷达数据进行比较, 结果一致。我们采用的是 Holdswath^[11]的大气散射模型, 简要介绍如下。

第 i 个散射体 (天顶角为 θ_i) 散射回波幅度和相位分别为

$$a_i = p_i R_i \sqrt{P(\theta_i)}, \quad \phi_i = 2\pi \left(\frac{|r_{ti}| + |r_{ri}|}{\lambda} \right). \quad (33)$$

式(33)中 p_i 为反射系数; R_i 为距离门权重函数; $P(\theta_i)$ 为波束宽度加权函数; $|r_{ti}|, |r_{ri}|$ 分别为第 i

表 1 主要仿真输入参数

Table 1 Main input parameters of simulation

频率 /MHz	距离 /km	距离分辨率 /km	发射波束 宽度 / $^{\circ}$	接收波束 宽度 / $^{\circ}$	抽样时间 /s	时间序列 长度	散射体 数量
1.98	90	2	15	∞	0.4	256	600

个散射体到发射机和接收机的距离; λ 为波长。同时, Holdsworth^[11] 利用该模型仿真了标准 FCA 算法, 充分证明了 FCA 对于此散射模型的适用性, 表 1 是文献 [11] 的主要仿真输入条件, 也作为本节仿真的输入条件。

SA 模型采用三组空间分离的天线, 每组天线的中心位于等边三角形的三个顶点上。对该散射模型来说, 模型预设集合平均速度值为 v_{mod} , 用 FCA 方法计算得水平平均速度为 v_{fca} , 用增量累积量方法计算得水平平均速度为 v_{ica} 。比较 v_{fca} , v_{ica} 和 v_{mod} 的差异, 检验我们方法的效果。

4.2 抑制地杂波模拟

模型输入速度为 $v_{\text{mod}} = 50 \text{ m/s}$, 用大气散射模型生成接收信号, 再加入了地杂波。地面杂波是一个随机变量, 如果存在着强的反射体, 则地杂波总体统计特性必然是非瑞利性的。为仿真方便, 不考虑强反射体, 则地杂波振幅统计特性是瑞利分布的, 即它的功率分布是指数分布的。可设

$$c(\mathbf{r}, t) = A[X_1^2(\mathbf{r}, t) + X_2^2(\mathbf{r}, t)]. \quad (34)$$

式中,

$$\begin{aligned} X_1(\mathbf{r}, t) &\approx N(0, \sigma_r^2; 0, \sigma_t^2), \\ X_2(\mathbf{r}, t) &\approx N(0, \sigma_r^2; 0, \sigma_t^2). \end{aligned} \quad (35)$$

即 $X_1(\mathbf{r}, t)$ 和 $X_2(\mathbf{r}, t)$ 为满足二维正态分布的随机变量, A 是地杂波影响因子, 取为常数。

分别用 FCA 方法和 ICA 方法计算平均水平速度, 比较 v_{fca} 与 v_{ica} 的差异 (见图 1)。图 1 显示有地杂波时 v_{fca} 随着天线间距的增加而增加; v_{ica} 随着天线间距的变化保持稳定, 变化在很小的范围内。说明 ICA 方法比 FCA 方法能更有效地抑制地杂波的影响。

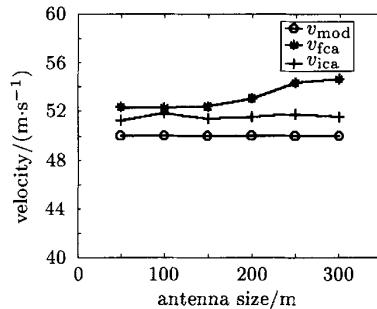
4.3 抑制大气非均匀性影响模拟

大气非平稳非均匀的原因和表现非常复杂。在仿真的时候举一种较简单的情况, 在某一个方向上 (例如纬向方向), 空间速度随着空间位置线性变化, 时间和空间尺度可满足局地均匀条件, 它的集合平

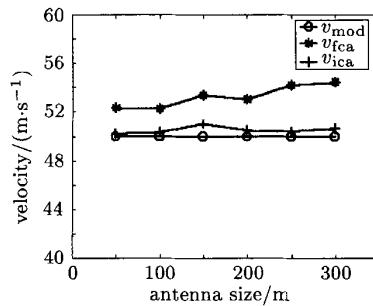
均速度是系统模型输入值 $v_{\text{mod}} = E(v)$ 模型, 表达式为

$$v = kx + 50. \quad (36)$$

式 (36) 表示以天线中心为原点, 纬线方向为 x 轴的模型速度分布。

图 1 地杂波存在时 v_{fca} 与 v_{ica} 的比较Fig.1 Comparison of v_{fca} and v_{ica} with ground clutter

这时来考察 FCA 和 ICA 求得纬向平均速度与模型输入值的差异 (见图 2)。图 2 显示局地均匀大气中 v_{fca} 随着天线间距的增加而增加, 相对模型速度有较大的偏离, 文献 [12] 在 MU 雷达实际数据的观测中也有同样的结果; v_{ica} 随着天线间距的变化保持稳定, 变化在很小的范围内。说明在局地均匀情况下 ICA 方法比 FCA 方法能更有效地抑制 TSE.

图 2 非均匀大气 v_{fca} 和 v_{ica} 的比较Fig.2 Comparison of v_{fca} and v_{ica} in the locally homogeneous atmosphere

5 结论

讨论了在空分天线风场测量中引起三角尺寸效应的主要原因(大气非平稳非均匀性、噪声效应),尤其是在非平稳非均匀条件下FCA方法引起TSE的具体机制。提出用增量累积量方法抑制非均匀大气TSE的方法,使风场测量在非平稳非均匀情况下也可以进行。该方法还可以抑制地杂波造成的影响。高阶($k \geq 3$)增量累积量方法还可以很好地压制高斯噪声。抑制地杂波和大气非均匀性数值试验结果与理论计算结果一致,即在有地杂波或者非均匀大气情况下采用ICA使测量水平风速稳定性有很大提高,天线间距变化时,测量风速变化不明显。进一步的工作需将非平稳大气在各种情况下做三维定量分析。

参考文献

- [1] Hocking W K. Strengths and limitation of MST radar measurements. *Ann. Geophys.*, 1997, **15**:1111~1122
- [2] Briggs B H. The analysis of spaced sensor records by correlation techniques. In: SCOSTEP Secr. Handbook for MAP (13). Urbana: Univ. Ill., 1984. 166~186
- [3] Holloway C L et al. Cross correlations and cross spectra for spaced antenna wind profilers 2, Algorithms to estimate wind and turbulence. *Radio Sci.*, 1997, **32**(3):967~982
- [4] Golley M G, Rossiter D E. Some tests of methods of analysis of ionospheric drift records using an array of 89 aerials. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1970, **32**:1215~1233
- [5] Meek C E. Triangle size effect in spaced antenna wind measurements. *Radio Sci.*, 1990, **25**(4):641~648
- [6] Van Baelen J S et al. SAD and interferometry analysis with the MU radar: Simulation and preliminary results. In: SCOSTEP Secr. Handbook for MAP (28), Urbana: Univ. Ill., 1989. 416~423
- [7] Fedor L S, Plywaski W. The interpretation of ionospheric radio drift measurements-IV: The effects of signal coupling among spaced sensor channels. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1971, **34**:1285~1303
- [8] Tatarski V I. Wave propagation in a turbulent medium. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc. 1961
- [9] Praskovsky A A, Praskovskaya E A. Structure-function-based approach to analyzing received signals for spaced antenna radars. *Radio Sci.*, 2003, **38**(4):7-1~7-25
- [10] Muschinski A et al. First synthesis of wind-profiler signals on the basis of large-eddy simulation data. *Radio Sci.*, 1999, **34**(6):1437~1459
- [11] Holdsworth D A et al. A simple model of atmospheric radar backscatter: Description and application to the full correlation analysis of spaced antenna data. *Radio Sci.*, 1995, **30**(4):1263~1280
- [12] Van J S et al. Comparison of VHF Doppler beam swinging and spaced antenna observations with the MU radar: First results. *Radio Sci.*, 1989, **25**(4):629~640

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>