-0

D

Для вимірювання швидкості вітру в атмосферному прикордонному шарі ефективним є застосування акустичних локаторів. Подано методику визначення оптимальних кутів місця антен в системах акустичного зондування атмосферного прикордонного шару, що забезпечує мінімізацію середньоквадратичних похибок вимірювання горизонтальної складової швидкості вітру. Наведені отримані розрахункові формули, визначений діапазон значень кутів місця напрямків зондування, забезпечуючих мінімальні похибки

Ключові слова: акустичне зондування, атмосферний прикордонний шар, кути місця антен, середньоквадратична похибка

Для измерения скорости ветра в атмосферном пограничном слое эффективным является применение акустических локаторов. Представлена методика определения оптимальных углов места антенн в системах акустического зондирования атмосферного пограничного слоя, что обеспечивает минимизацию среднеквадратических погрешностей измерения горизонтальной составляющей скорости ветра. Приведены полученные расчетные формулы, определен диапазон значений углов места направлений зондирования, обеспечивающих минимальные ошибки

Ключевые слова: акустическое зондирование, атмосферный пограничный слой, углы места антенн, среднеквадратическая погрешность

1. Введение

-0

В связи с необходимостью обеспечения энергетической безопасности во многих странах мира, в том числе и в Украине, ведутся разработки альтернативных возобновляемых источников энергии, к которым относятся и высокоэффективные ветроэнергетические установки, размещаемые на мачтах высотой до 100 метров. Размещение ветроэнергетических установок целесообразно только в местностях с интенсивными ветрами, поэтому при их проектировании и эксплуатации необходимы исследования ветровой обстановки в предполагаемых местах размещения. Для решения задач исследования ветровой обстановки в атмосферном пограничном слое эффективным является использование акустических локаторов, которые выполняются для этих целей в мобильном варианте. Такие локаторы строятся по моностатическому и бистатическому принципу. В первом случае вектор скорости ветра определяется по результатам зондирования атмосферы в трех различных направлениях, во втором - применяется трехканальная система с тремя различными приемными антеннами, диаграммы направленности которых пересекаются с вертикально направленной диаграммой антенны передатчика в заданной точке пространства. При проектировании DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27900

ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛОВ МЕСТА АНТЕНН СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Я. Г. Сидоров

Кандидат технических наук, научный сотрудник Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины ул. Ак. Проскуры, 12, г. Харьков, Украина, 61085 E-mail: yaroslav.sydorov@gmail.com

Г. И. Сидоров

Кандидат технических наук, профессор Кафедра радиоэлектронных систем Харьковский национальный университет радиоэлектроники пр. Ленина, 16, г. Харьков, Украина, 61166 E-mail: res@kture.kharkov.ua

таких локаторов возникает задача оптимального (при заданных ограничениях) выбора направлений зондирования и размещения приемных антенн относительно передающей антенны [1]. Целевой функцией оптимизации в этом случае может служить погрешность измерений, минимизируемая либо не превышающая заданного значения.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Проблемам изучения атмосферного пограничного слоя в настоящее время уделяется самое серьезное внимание, о чем свидетельствуют регулярно проводимые международные конференции ISARS. В материалах конференций обсуждаются различные модели процессов в пограничном атмосферном слое: ветровых потоков, турбулентных пульсаций температуры и влажности, диэлектрической проницаемости и т. д., однако методики экспериментальных исследований и описания аппаратуры, необходимой для этих исследований, не приводятся [2, 3]. Также описываются технические устройства, в частности акустические локаторы, однако технические характеристики этих устройств и пути их совершенствования не рассматриваются

[4, 5], приводятся методики измерений, обработки и интерпретации результатов, однако источники погрешностей и методы их уменьшения не рассматриваются [6, 7]. Таким образом, методы оптимизации антенных устройств в пространстве и метрологической аттестации этих устройств не рассматриваются, поэтому в работе сделана попытка проанализировать данные вопросы и предложить конкретные ответы на них.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка методов оптимизации установки антенных систем моностатического и бистатического акустических локаторов при зондировании атмосферного пограничного слоя. Критерием оптимизации является обеспечение минимума относительной среднеквадратической погрешности измерения модуля скорости горизонтального ветра. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

 – разрабатывается общая методика вычисления компонент скорости ветра в декартовой системе координат по результатам измерений доплеровских сдвигов частоты в заданных направлениях зондирования;

 – на основании общей методики оценки погрешностей косвенных измерений разрабатывается методика оценки погрешностей измерений скорости ветра акустическими локаторами;

 – определение диапазона значений углов установки антенн в вертикальной плоскости, обеспечивающих минимизацию среднеквадратической погрешности измерений.

4. Обоснование методики выбора оптимальных углов места для установки антенной системы

4. 1. Вычисление составляющих скорости ветра в декартовой системе координат по результатам зондирования

В общем случае вектор скорости ветра $\bar{\mathrm{V}}\,$ представляется суммой

$$\vec{V} = \sum_{l=1}^{3} V_{l} \vec{m}_{l} , \qquad (1)$$

где – индекс направления, либо номер приемного канала в базовой системе координат (БСК), оси которой совпадают с направлениями зондирования, \vec{m}_1 – единичный вектор БСК. Используя общую методику преобразования координат [8], получаем

$$\begin{bmatrix} V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \end{bmatrix},$$
(2)

где $\begin{bmatrix} V_l \end{bmatrix}$ – вектор-столбец проекций \vec{V} в БСК; $\begin{bmatrix} V_d \end{bmatrix}$ – вектор столбец проекций \vec{V} в декартовой системе координат (ДСК), составленный из проекций V_x , V_y , V_z , К – матрица коэффициентов, описывающих углы направлений зондирования. Обратное преобразование имеет вид

$$\begin{bmatrix} V_{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{l} \end{bmatrix},$$
(3)

Для моностатической системы, расположенной в центре ДСК,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 \cos\gamma_1 & \cos\delta_1 \sin\gamma_1 & \sin\delta_1 \\ \cos\delta_2 \cos\gamma_2 & \cos\delta_2 \sin\gamma_2 & \sin\delta_2 \\ \cos\delta_3 \cos\gamma_3 & \cos\delta_3 \sin\gamma_3 & \sin\delta_3 \end{bmatrix}.$$
 (4)

Для бистатической системы передатчик которой размещен в центре ДСК и излучает энергию в направлении, перпендикулярном к плоскости ХОҮ, а приемники размещены в плоскости ХОҮ

$$] = \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{90^{\circ} \cdot \delta_{1}}{2}\right) \cos \gamma_{1} & \sin\left(\frac{90^{\circ} \cdot \delta_{1}}{2}\right) \sin \gamma_{1} & -\cos\left(\frac{90^{\circ} \cdot \delta_{1}}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{90^{\circ} \cdot \delta_{2}}{2}\right) \cos \gamma_{2} & \sin\left(\frac{90^{\circ} \cdot \delta_{2}}{2}\right) \sin \gamma_{2} & -\cos\left(\frac{90^{\circ} \cdot \delta_{2}}{2}\right) \\ \sin\left(\frac{90^{\circ} \cdot \delta_{3}}{2}\right) \cos \gamma_{3} & \sin\left(\frac{90^{\circ} \cdot \delta_{3}}{2}\right) \sin \gamma_{3} & -\cos\left(\frac{90^{\circ} \cdot \delta_{2}}{2}\right) \end{bmatrix}.$$
(5)

Здесь δ_1 – угол места; γ_1 – угол между осью ОХ и проекцией оси диаграммы направленности приемной антенны на горизонтальную плоскость.

При симметричном выборе направлений зондирования

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta$$
, $\gamma_1 = \gamma$, $\gamma_2 = \gamma + 120^\circ$, $\gamma_3 = \gamma + 240^\circ$. (6)

Значения компонент скорости ветра $V_{\rm l}$ в БСК связаны с доплеровскими сдвигами частоты принимаемых сигналов $F_{\rm l}$ следующими соотношениями:

- при моностатическом зондировании

$$V_{l} = -F_{l}\lambda_{0}/2, \qquad (7)$$

- при бистатическом зондировании

$$V_{l} = -F_{l}\lambda_{0} / \left(2\sin\frac{90^{\circ} + \delta}{2}\right), \tag{8}$$

где длина волны излучаемого колебания определяется из выражения

$$\lambda_0 = a\sqrt{T} / f_0, \qquad (9)$$

в котором Т – температура рассеивающего объёма; а – коэффициент пропорциональности.

Решение матричного уравнения (3) с учетом (4), (6), (7), (9) для случая моностатического зондирования дает следующие результаты:

$$V_{x} = \frac{a\sqrt{T}}{6f_{0}\cos\delta} \times \left[-2F_{1}\cos\gamma + F_{2}\left(\sqrt{3}\sin\gamma + \cos\gamma\right) - F_{3}\left(\sqrt{3}\sin\gamma - \cos\gamma\right)\right], (10)$$
$$V_{y} = \frac{a\sqrt{T}}{\sqrt{3}f_{0}\cos\delta} \times \left[-2F_{1}\sin\gamma + F_{2}\left(\sin\gamma - \sqrt{3}\cos\gamma\right) + F_{3}\left(\sin\gamma + \sqrt{3}\cos\gamma\right)\right], (11)$$

$$V_z = \frac{a\sqrt{T}}{3f_0 \sin \delta} \left[F_1 + F_2 + F_3 \right].$$
(12)

Аналогично для случая бистатического зондирования

$$V_{x} = \frac{a\sqrt{T}}{3f_{0}\cos\delta} \times \left[-2F_{1}\cos\gamma + F_{2}\left(\sqrt{3}\sin\gamma + \cos\gamma\right) - F_{3}\left(\sqrt{3}\sin\gamma - \cos\gamma\right)\right], (13)$$
$$V_{y} = \frac{a\sqrt{T}}{\sqrt{3}f_{1}\cos\delta} \times$$

$$\times \left[-2F_{1}\sin\gamma + F_{2}\left(\sin\gamma - \sqrt{3}\cos\gamma\right) + F_{3}\left(\sin\gamma + \sqrt{3}\cos\gamma\right)\right], (14)$$

$$V_{z} = -\frac{a\sqrt{T}}{3f_{0}(1+\sin\delta)} \Big[F_{1} + F_{2} + F_{3} \Big].$$
(15)

Представляя модуль горизонтальной компоненты скорости ветра и его направление ϕ_h в полярной системе координат, считая, что ось OX совпадает с направлением на север, получим

$$V_{\rm h} = \sqrt{V_{\rm x}^2 + V_{\rm y}^2} \ ; \ \varphi = arctg \frac{V_{\rm y}}{V_{\rm x}} \ , \label{eq:Vh}$$

где ф — угол между направлением на север и проекцией модуля скорости ветра.

4. 2. Методика оценки суммарных среднеквадратических погрешностей измерений скорости ветра

При выполнении косвенных измерений, когда измеряется не интересующая нас величина, а какаялибо другая, функционально зависящая от нее [9], ошибка таких измерений может быть легко получена с помощью методов дифференциального исчисления. Если измеряемая величина у есть функция многих переменных х_i, среднеквадратическая ошибка может быть вычислена по формуле ветра в полярной системе координат ($V_x = V_h \cos \phi$, $V_y = V_h \sin \phi$), идентичности измерительных каналов ($\sigma_{F_1} = \sigma_{F_2} = \sigma_{F3} = \sigma_F$), и использовании высокостабильного задающего генератора ($\sigma_{f_0} \approx 0$), окончательно получим:

для случая моностатического зондирования

$$\begin{split} \sigma_{V_{x}} &= \left[\left(V_{h} \cdot \cos \phi \cdot tg \delta \cdot \sigma_{\delta} \right)^{2} + \left(V_{h} \cdot \sin \phi \cdot \sigma_{\gamma_{x}} \right)^{2} + \right. \\ &+ \left(\frac{V_{h} \cdot \cos \phi}{a} \cdot \sigma_{a} \right)^{2} + \left(\frac{V_{h} \cdot \cos \phi}{2T} \cdot \sigma_{T} \right)^{2} + \left(\frac{2}{3} \frac{a \sqrt{T}}{f_{0} \cos \delta} \cdot \sigma_{F} \right)^{2} \right]^{1/2}, (17) \end{split}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{Vy}} &= \left[\left(\mathrm{V}_{\mathrm{h}} \cdot \sin \boldsymbol{\phi} \cdot \mathrm{tg} \boldsymbol{\delta} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{\delta}} \right)^{2} + \left(\mathrm{V}_{\mathrm{h}} \cdot \cos \boldsymbol{\phi} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\boldsymbol{\gamma}_{\mathrm{y}}} \right)^{2} + \right. \\ &+ \left(\frac{\mathrm{V}_{\mathrm{h}} \cdot \sin \boldsymbol{\phi}}{\mathrm{a}} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{a}} \right)^{2} + \left(\frac{\mathrm{V}_{\mathrm{h}} \cdot \sin \boldsymbol{\phi}}{2\mathrm{T}} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{T}} \right)^{2} + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\mathrm{a}\sqrt{\mathrm{T}}}{\mathrm{f}_{0} \cos \boldsymbol{\delta}} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{F}} \right)^{2} \right]^{1/2}, (18) \end{aligned}$$

$$\sigma_{V_z} = \sqrt{\left(\frac{V_z}{tg\delta} \cdot \sigma_{\delta}\right)^2 + \left(\frac{V_z}{a} \cdot \sigma_{a}\right)^2 + \left(\frac{V_z}{2T} \cdot \sigma_{T}\right)^2 + \left(\frac{a\sqrt{T}}{f_0 \sin\delta} \cdot \sigma_{F}\right)^2}, (19)$$

для случая бистатического зондирования

$$\begin{split} \sigma_{V_{x}} &= \left[\left(V_{h} \cdot \cos \phi \cdot tg \delta \cdot \sigma_{\delta} \right)^{2} + \left(V_{h} \cdot \sin \phi \cdot \sigma_{\gamma_{x}} \right)^{2} + \\ &+ \left(\frac{V_{h} \cdot \cos \phi}{a} \cdot \sigma_{a} \right)^{2} + \left(\frac{V_{h} \cdot \cos \phi}{2T} \cdot \sigma_{T} \right)^{2} + \left(\frac{4}{3} \frac{a \sqrt{T}}{f_{0} \cos \delta} \cdot \sigma_{F} \right)^{2} \right]^{1/2}, (20) \end{split}$$

$$\begin{split} \sigma_{\rm Vy} &= \left[\left(V_{\rm h} \cdot \sin \phi \cdot tg \delta \cdot \sigma_{\delta} \right)^2 + \left(V_{\rm h} \cdot \cos \phi \cdot \sigma_{\gamma_{\rm y}} \right)^2 + \right. \\ &+ \left(\frac{V_{\rm h} \cdot \sin \phi}{a} \cdot \sigma_{\rm a} \right)^2 + \left(\frac{V_{\rm h} \cdot \sin \phi}{2T} \cdot \sigma_{\rm T} \right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{a \sqrt{T}}{f_0 \cos \delta} \cdot \sigma_{\rm F} \right)^2 \right]^{1/2}, (21) \end{split}$$

$$\sigma_{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial x_{i}} \sigma_{x_{i}}\right)^{2}}, a \text{ относительная погреш-}$$

ность по формуле $\Delta y = \frac{\sigma_{y}}{y}.$

$$\sigma_{V_{z}} = \sqrt{\left(\frac{V_{z} \cos \delta}{1 + \sin \delta} \cdot \sigma_{\delta}\right)^{2} + \left(\frac{V_{z}}{a} \cdot \sigma_{a}\right)^{2} + \left(\frac{V_{z}}{2T} \cdot \sigma_{T}\right)^{2} + \left(\frac{a\sqrt{T}}{f_{0}(1 + \sin \delta)} \cdot \sigma_{F}\right)^{2}}.$$
(22)

В нашем случае среднеквадратические значения погрешностей измерения $V_{\rm x}\,,\,V_{\rm y}\,,\,V_{\rm z}\,$ могут быть найдены по общей формуле

$$\boldsymbol{\sigma}_{V_{d}} = \left[\left(\left| \frac{\partial V_{d}}{\partial \delta} \right| \boldsymbol{\sigma}_{\delta} \right)^{2} + \left(\left| \frac{\partial V_{d}}{\partial \gamma} \right| \boldsymbol{\sigma}_{\gamma} \right)^{2} + \left(\left| \frac{\partial V_{d}}{\partial a} \right| \boldsymbol{\sigma}_{a} \right)^{2} + \left(\left| \frac{\partial V_{d}}{\partial T} \right| \boldsymbol{\sigma}_{T} \right)^{2} + \left(\left| \frac{\partial V_{d}}{\partial f_{0}} \right| \boldsymbol{\sigma}_{f_{0}} \right)^{2} + \left(\left| \frac{\partial V_{d}}{\partial F_{1}} \right| \boldsymbol{\sigma}_{F_{1}} \right)^{2} + \left(\left| \frac{\partial V_{d}}{\partial F_{2}} \right| \boldsymbol{\sigma}_{F_{2}} \right)^{2} + \left(\left| \frac{\partial V_{d}}{\partial F_{3}} \right| \boldsymbol{\sigma}_{F_{3}} \right)^{2} \right]^{1/2}.$$
(16)

При $\gamma = 0$, что соответствует горизонтальной проекции оси диаграммы направленности приемной антенны первого канала по оси OX, задании компонент горизонтальной составляющей скорости

Выражения для оценки среднеквадратических погрешностей определения модуля и направления горизонтальной составляющей скорости ветра в полярной системе координат имеют вид:

$$\sigma_{V_{h}} = \sqrt{(\cos\phi \cdot \sigma_{V_{x}})^{2} + (\sin\phi \cdot \sigma_{V_{y}})^{2}}, \qquad (23)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\phi} = \sqrt{\left(\frac{\sin\phi}{V_{h}} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{V_{x}}\right)^{2} + \left(\frac{\cos\phi}{V_{h}} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{V_{y}}\right)^{2}} .$$
(24)

Представление всех оценок в полярной системе координат соответствует общепринятым методикам в авиационной метеорологии [10].

4. 3. Оценка суммарных среднеквадратических погрешностей измерений для моностатического и бистатического локаторов

Анализ условий работы акустического локатора показывает, что составляющие погрешностей имеют различный характер. Члены, содержащие σ_a , σ_T зависят только от значений температуры и влажности в исследуемой области пространства, значения остальных членов определяются техническими характеристиками локатора, выбором углов зондирования и ветровой обстановкой вдоль трассы распространения акустических волн. Рассмотрим структуру величин σ_8 , σ_Y , σ_F .

Величины σ_{δ} , σ_{γ} характеризуют отклонения углов прихода акустической волны от выбранных в формулах (4)–(6) направлений зондирования в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$\sigma_{\delta} = \sqrt{\sigma_{\delta_1}^2 + \sigma_{\delta_2}^2 + \sigma_{\delta_3}^2} , \qquad (25)$$

$$\sigma_{\gamma} = \sqrt{\sigma_{\gamma_1}^2 + \sigma_{\gamma_2}^2 + \sigma_{\gamma_3}^2} , \qquad (26)$$

где σ_{δ_1} , σ_{γ_1} – погрешности первоначальной установки геометрических осей антенн; σ_{δ_2} , σ_{γ_2} – погрешности настройки, учитывающие расхождение между электрической и геометрической осями антенн; σ_{δ_3} , σ_{γ_3} – погрешности, возникающие из-за ветровой рефракции.

В предположении, что скорость и направление ветра неизменны вдоль трассы акустического зондирования и их значения равны этим величинам в рассеивающем объеме, получим для моностатического зондирования

$$\sigma_{\delta_{3}} \approx 2V_{z}\cos\delta / \left(a\sqrt{T} - V_{z}\sin\delta\right), \qquad (27)$$

$$\sigma_{\gamma_{3x}} = 2\arcsin\left|\frac{V\sin\phi}{a\sqrt{T}}\right|,\tag{28}$$

$$\sigma_{\gamma_{3y}} = 2 \arcsin \left| \frac{V \cos \phi}{a \sqrt{T}} \right|, \qquad (29)$$

для бистатического

$$\sigma_{\delta_{3}} \approx V_{z} \cos \delta / \left(a \sqrt{T} - V_{z} \sin \delta \right), \tag{30}$$

$$\sigma_{\gamma_{3x}} = \arcsin\left|\frac{V\sin\phi}{a\sqrt{T}}\right|,\tag{31}$$

$$\sigma_{\gamma_{3y}} = \arcsin \left| \frac{V \cos \phi}{a \sqrt{T}} \right|.$$
(32)

Величина σ_F представляет собой среднеквадратическую погрешность измерения средней доплеровской частоты и зависит от выбранного способа измерения и соотношения сигнал/помеха на входе измерителя. При использовании метода счета числа пересечений нуля [11]

$$\sigma_{\rm F} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi T_{\rm m}\sqrt{q}} = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi N T_{\rm e}\sqrt{q}},\tag{33}$$

где T_m – мерный интервал, кратный числу N периодов T_∂ измеряемого сигнала; $q = q_n \cdot v$ – эквивалентное отношение сигнал/помеха на входе измерителя, q_n –

отношение сигнал/помеха на выходе широкополосной части акустического локатора, зависящее от мощности излучаемого сигнала, длины трассы зондирования и пространственного распределения внешнего шума, поскольку в акустических локаторах всегда выполняется соотношение $P_{n_{int}} << P_{n_{ext}}$ [12]; ν – коэффициент, пропорциональный отношению полос пропускания широкополосной и узкополосной частей приемника акустического локатора и учитывающий особенности конкретного измерителя. Произведение N T₂ не зависит от соотношения сигнал/помеха и, следовательно, не влияет на выбор оптимальных углов зондирования. При моностатическом импульсном зондировании $v \approx 1$, при использовании в бистатическом локаторе непрерывного излучения и узкополосного следящего фильтра v>>1. При заданной высоте зондирования Н длина трассы и характеристики внешнего шума определяются углом места приемных антенн б. С уменьшением δ расстояние до рассеивающего объёма увеличивается, мощность принимаемого сигнала уменьшается, а мощность внешнего шума увеличивается. Следовательно, уменьшается соотношение сигнал/помеха и возрастает ошибка измерения. С другой стороны, с уменьшением угла б увеличивается проекция скорости ветра на горизонтальную плоскость и уменьшается методическая ошибка измерения. Таким образом, существует значение оптимального угла зондирования в вертикальной плоскости, которое может быть определено аналитически. Выбрав максимально допустимый угол зондирования $\delta_{\rm m}$, можно считать отношение сигнал/помеха при этом угле нормирующим и обозначать его как

$$q_0 = 2P_s(\delta_m) / 2P_n(\delta_m).$$
(34)

При меньших углах зондирования

$$q(\delta) = A(\delta) \cdot q_0, \qquad (35)$$

где
$$A(\delta) = P_s(\delta) \cdot P_n(\delta_m) / P_s(\delta_m) \cdot P_n(\delta)$$
. (36)

Следовательно, характер зависимости значения $q(\delta)$ полностью определяется функцией $A(\delta)$.

Найдем зависимости $P_s(\delta)$, $P_n(\delta)$.

В случае моностатической системы

$$P_{s}(\delta) = P_{rad} \cdot \xi(\theta) \cdot L(\delta) \frac{A_{eff}}{R^{2}(\delta)} \cdot \frac{c \cdot \tau_{i}}{2}, \qquad (37)$$

в случае бистатической системы

$$P_{s}(\delta) = P_{rad} \cdot G \cdot \xi(\theta) \cdot V(\delta) \cdot L(\delta) \frac{A_{eff}}{H^{2} \cdot R^{2}(\delta)}, \qquad (38)$$

где P_{rad} – мощность передатчика; G – коэффициент усиления передающей антенны; A_{eff} – эффективная площадь приемной антенны; $\xi(\theta)$ – сечение рассеяния; θ – угол рассеяния; – скорость звука; τ_i – длительность импульса; H – высота зондируемого слоя; $R(\delta)$ – длина пути от рассеивающего объема на высоте H до приемной антенны; $L(\delta)$ – множитель ослабления звука на трассе распространения звуковых волн, $V(\delta)$ – рассеивающий объём.

Для колмогоровского спектра турбулентности сечение рассеяния имеет вид [13]

$$\xi(\theta) = 0.055\lambda^{-1/3} \times \\ \times \cos^2 \theta \left[\frac{C_V^2}{c^2} \cos^2 \frac{\theta}{2} + 0.13 \frac{C_T^2}{T^2} \right] \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)^{-11/3},$$
(39)

где λ – длина волны; C_T^2 , C_V^2 – структурные постоянные флуктуаций температуры и скорости ветра; Т – абсолютная температура рассеивающего объёма.

В случае моностатического зондирования $\theta = \pi$, в случае бистатического $\theta = 90^\circ + \delta$. Рассеивающий объем V(δ) при бистатическом методе локации и использовании непрерывного излучения определяется областью пересечения диаграмм направленности передающей и приемной антенн и приближенно может быть вычислен по формуле

$$V(\delta) = \frac{\pi \cdot H^3 \cdot tg^2 \theta_1}{3tg^3 \delta} \times \left[tg^2 (\delta - \theta_2) + tg^2 (\delta + \theta_2) + tg(\delta + \theta_2) tg(\delta - \theta_2) \right], \quad (40)$$

где **θ**₁ и **θ**₂ – эффективная полуширина диаграмм направленности передающей и приемной антенны соответственно.

Множитель ослабления звука для случаев моностатического и бистатического зондирований определяется по формулам

$$L(\delta) = 10^{-0.2\alpha R(\delta)}; \ L(\delta) = 10^{-0.1\alpha [H+R(\delta)]},$$
(41)

где α – коэффициент ослабления звука, зависящий от частоты сигнала, дБ/м. Согласно [14] $\alpha = 0.035 f_0 - 0.0066$, где f_0 – в кГц.

По экспериментальным данным с использованием метода выравнивания [15] произведен подбор эмпирической формулы для P_n(**δ**) в нормированных единицах

$$P_{n}(\delta) = 32\delta^{-2.15}.$$
(42)

Учитывая (35)–(41), окончательно имеем

– для моностатического зондирования

$$A(\delta) = \left(\frac{90^{\circ}}{\delta}\right)^{-2.15} \sin^2 \delta \cdot 10^{-0.2\alpha H \left(\frac{1}{\sin \delta} - 1\right)};$$
(43)

- для бистатического зондирования

$$A(\delta) = \frac{\sin \delta \cos^{3} \delta \left[\frac{1}{2} (1 + \sin \delta) \right]^{-\frac{11}{6}} \left[\frac{C_{V}^{2}}{2c^{2}} (1 - \sin \delta) + 0.13 \frac{C_{T}^{2}}{T^{2}} \right]}{\sin \delta_{m} \cos^{3} \delta_{m} \left[\frac{1}{2} (1 + \sin \delta_{m}) \right]^{-\frac{11}{6}} \left[\frac{C_{V}^{2}}{2c^{2}} (1 - \sin \delta_{m}) + 0.13 \frac{C_{T}^{2}}{T^{2}} \right]} \times \frac{tg^{2} (\delta - \theta_{2}) + tg^{2} (\delta + \theta_{2}) + tg (\delta - \theta_{2}) tg (\delta + \theta_{2})}{tg^{2} (\delta_{m} - \theta_{2}) + tg^{2} (\delta_{m} + \theta_{2}) + tg (\delta_{m} - \theta_{2}) tg (\delta_{m} + \theta_{2})} \cdot \left(\frac{\delta_{m}}{\delta} \right)^{-2.15} \times \times 10^{-0.1 \text{cH} \left(\frac{1}{\sin \delta} \frac{1}{\sin \delta_{m}} \right)}.$$
(44)

Характер зависимости максимальных погрешностей измерения компонент скорости ветра, вычисленных по формулам (17)–(24) позволяет обосновать выбор оптимальных углов зондирования δ_{opt} и требования к некоторым техническим параметрам акустических

локаторов: мощности, чувствительности приемника, способу обработки принимаемого сигнала.

5. Результаты моделирования ветровых режимов, исследуемых акустическими локаторами

На рис. 1 представлены результаты расчетов относительных среднеквадратических погрешностей измерения модуля горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра σ_{V_h}/V_h , σ_{V_v}/V_v для случаев моностатического и бистатического локаторов при следующих значениях величин, входящих в расчетные формулы: $f_0 = 1000, 5000$ Гц; H = 50, 100, 150 м; $V_h = 20$ м/с; $V_z = 2$ м/с; T = 273 K; a = 20,05 м·с⁻¹·град^{-1/2}; $\sigma_a = 0,02$ м·с⁻¹·град^{-1/2}; $C_T^2 = 0,004$ град²·м^{-2/3}; $C_V^2 = 0,05$ м^{4/3}·c⁻²; c = 332 м/с; $\phi = 10^\circ$; $\sigma_T = 0,5^\circ$; $\theta = 3^\circ$; $\sigma_{\delta_1} = \sigma_{\gamma_1} = 0,5^\circ$; $\sigma_{\delta_2} = \sigma_{\gamma_2} = 0,5^\circ$; δ_{00}

Для расчетов по формуле (33) положим $N \cdot T_{\partial} = 1 c$.



Рис. 1. Зависимости относительных среднеквадратических погрешностей измерений модуля компонент скорости ветра от углов места антенн для случаев моностатического и бистатического локаторов (штрихпунктирная (1) и сплошная (2) линии моностатический локатор на частотах f₀=1000 Гц и f₀=5000 Гц соответственно, штриховая (3) и точечная (4) линии — бистатический локатор на частотах f₀=1000 Гц и f₀=5000 Гц соответственно): a — для горизонтальной компоненты на высоте 50 м; b — для вертикальной компоненты на высоте 100 м; a — для вертикальной компоненты на высоте 100 м; d — для горизонтальной компоненты на высоте 150 м; e — для вертикальной компоненты на высоте 150 м; e — для вертикальной

6. Обсуждение результатов математического моделирования ветровых режимов в атмосферном пограничном слое

По критерию минимума относительной среднеквадратической погрешности измерения модуля значения горизонтальной составляющей скорости ветра возможно определение оптимальных углов зондирования в вертикальной плоскости для случаев моностатического и бистатического зондирования на каждой из рабочих частот для разных значений высот и силы ветра.

Видно, что при выборе углов места в пределах от 40° до 60° относительная среднеквадратическая погрешность измерений не превышает 5 % (рис. 1, *a*, *b*, *d*). При этом также обеспечивается удовлетворительная среднеквадратическая погрешность измерения вертикальной компоненты скорости ветра не более 10 % (рис. 1, *б*, *г*, *е*).

Из графиков (рис. 1) видно, что при бистатическом зондировании погрешности измерений меньше, чем при моностатическом при равных мощностях передатчиков и времени накопления сигналов. Поскольку при бистатическом зондировании разрешающая способность определяется пересечением диаграмм направленности, а не длительностью импульса, как в случае моностатического зондирования, имеется возможность увеличить время накопления сигнала и в дальнейшем уменьшить погрешность измерения.

При одинаковом времени измерения в бистатическом режиме мощность излучения постоянна и равна средней мощности акустического локатора, а при импульсном методе необходимо иметь большую мощность импульсов, что усложняет конструкцию передатчика.

7. Выводы

В статье авторами сформулированы и решены следующие научно-технические задачи:

1. В работе предложена, теоретически обоснована и подтверждена соответствующими расчетами методика оптимизации углов места антенн системы акустического зондирования атмосферного пограничного слоя.

2. Разработана методика вычисления компонент скорости ветра в декартовой системе координат с использованием измеренных значений доплеровских сдвигов частоты в каналах акустического локатора в базовой системе координат с использованием матричного описания конфигурации зондирования и трехмерного описания вектора скорости ветра.

3. Разработана частная методика оценки суммарной среднеквадратической погрешности измерений скорости и направления ветра системами дистанционного акустического зондирования с учетом влияния на результаты измерений погрешностей углов установки антенн, погрешностей измерения значений доплеровских сдвигов частоты, флуктуаций температуры и влажности воздуха вдоль трассы зондирования.

4. Предложена методика оптимизации значений углов зондирования в вертикальной плоскости по критерию минимума среднеквадратической погрешности измерений, которая зависит как от технических характеристик акустических локаторов, так и от имеющихся соотношений сигнал/шум при различных углах зондирования.

5. По полученным формулам выполнены расчеты относительных среднеквадратических погрешностей измерений горизонтальной и вертикальной составляющих скорости ветра при зондировании воздушных слоев на разных высотах сигналами разных частот. Приведены графики зависимостей значений от углов места, показан диапазон оптимальных углов для обеспечения удовлетворительных погрешностей измерений.

Литература

- Davey, R. F. A comparison of doppler sodar antenna configurations used for horizontal wind measurement [Text] / R. F. Davey // J. Acust. Soc. Am. – 1978. – Vol. 63, Issue 5. – P. 68–78. doi:10.1121/1.381887.
- Gryning, S. E. Some challenges of wind modelling for modern wind turbines: the Weibull distribution [Text] / S. E. Gryning, E. Batchvarova, R. Floors, A. Pena // 16th Int. Symp. for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing. – Boulder, 2012. – P. 194–197.
- Lothon, M. Studying the Boundary Layer Late Afternoon and Sunset Turbulence (BLLAST) [Text] / M. Lothon, D. H. Lenschow, W. Angevine et al. // 15th Int. Symp. for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing. – 28–30 June 2010, Paris, France.
- Strehz, A. Field results from a new miniature bistatic sodar [Text] / A. Strehz, S. Bradley, K. Underwood // 16th Int. Symp. for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing. – Boulder, 2012. – P. 120-123.
- Al-Sakka, H. Analysis and studies of the Atmospheric Boundary Layer properties (wind and turbulence) with the CURIE radar [Text] / H. Al-Sakka, A. Weill, C. Legac, L. Chardenal // 15th Int. Symp. for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing. - 28–30 June 2010, Paris, France.
- Krasnenko, N. P. Retrieval of the temperature and velocity structure parameters from sodar data with allowance for the excess turbulent attenuation [Text] / N. P. Krasnenko, L. G. Shamanaeva // 16th Int. Symp. for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing. – Boulder, 2012. – P. 194-197.
- Steeneveld, G. J. Daytime boundary-layer growth in models and observations: in search of missing energy [Text] / G. J. Steeneveld, L. Tolk, A. F. Moene et al. // 15th Int. Symp. for the Advancement of Boundary-Layer Remote Sensing. – 28–30 June 2010, Paris, France.

8. Корн, Г. Справочник по математике [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 764 с.

- 9. Зейдель, А. Н. Ошибки измерения физических величин [Текст] / А. Н. Зейдель. Л.: Наука, 1974. 108 с.
- Астапенко, П. Д. Авиационная метеорология [Текст] : учеб. пособие / П. Д. Астапенко, А. М. Баранов, И. М. Шварев и др. М.: Транспорт, 1979. – 263 с.
- 11. Тузов, Г. И. Выделение и обработка информации в допплеровских системах [Текст] / Г. И. Тузов. М.: Сов. радио, 1976. 256 с.
- Little, C. G. Acoustic methods for the remote probing of the lower atmosphere [Text] / C. G. Little // Pros. IEEE. 1969. Vol. 57, №. 4. – P. 571-578. doi:10.1109/proc.1969.7010.
- Калистратова, М. А. Экспериментальные исследования рассеяния звуковых волн в атмосфере [Текст] / М. А. Калистратова // Тр. ИФА СССР. – 1962. – №4. – С. 203-256.
- Smith, P. L. Remote measurement of wind velocity by the electromagnetic acoustic probe I: System analysis [Text] / P. L. Smith // Proc. Natnl. Conv. Mil. Electron 5th. – Kansas city, 1961. – P. 48-53.
- 15. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. М.: ГИИТЛ, 1956. 608 с.

У статі представлено метод прогнозування зміни ймовірності втрати циклової синхронізації на основі моніторингу коефіцієнта бітових помилок у мережі рівня розподілу/агрегації оператора мобільного зв'язку в умовах застосування режиму емуляції каналу. Розроблений метод прогнозування зміни ймовірності втрати циклової синхронізації формалізовано за допомогою алгоритму. Розроблений метод має стати основою експертної системи мережного моніторингу

-0

Ключові слова: емуляція каналів, прогнозування ймовірності втрати циклової синхронізації, мережа мобільного оператора

В статье представлен метод прогнозирования изменений вероятности потери цикловой синхронизации на основе мониторинга коэффициента битовых ошибок в сети уровня распределения/агрегации оператора мобильной связи в условиях применения режима эмуляции канала. Разработанный метод прогнозирования изменений вероятности потери цикловой синхронизации формализован с помощью алгоритма. Разработанный метод должен стать основой экспертной системы сетевого мониторинга

Ключевые слова: эмуляция каналов, прогнозирование вероятности потери цикловой синхронизации, сеть мобильного оператора

1. Введение

В современных конвергентных сетях, к которым можно отнести сети уровня распределения/агрегации мобильных операторов связи, особую актуальность приобретают вопросы мониторинга вероятностно-временных характеристик их состояния.

Мониторинг является основным способом отображения текущего состояния объекта технического обслуживания (его рабочих характеристик), а также обеспечивает возможность диагностики и прогнозирования изменений состояния объекта [1], что дает возможность техническому персоналу принимать упреждающие меры и предотвращать внештатную ситуацию.

В данной работе предлагается метод прогнозирования изменений вероятности потери цикловой

УДК 621.391

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28005

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ВЕРОЯТНОСТИ ПОТЕРИ ЦИКЛОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В КОНВЕРГЕНТНЫХ СЕТЯХ

Ю.О.Бабич Старший преподаватель* E-mail: babich159@gmail.com Л.А.Никитюк Кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой* E-mail: nikityuk_l@mail.ru *Кафедра сетей связи Одесская национальная академия связи им. А.С.Попова ул. Кузнечная, 1, г. Одесса, Украина, 65029

синхронизации Р_{АL} на основе мониторинга коэффициента битовых ошибок є в сети уровня распределения/агрегации оператора мобильной связи в условиях применения режима эмуляции канала. Метод позволяет отслеживать изменения величины P_{AL}, прогнозировать ситуации выхода ее за пороговое значение P_{ALT}, характеризуемое коэффициентом битовых ошибок, за пределами которого невозможно установить, что является причиной ошибок cyclic redundancy check (CRC) - сбой цикловой синхронизации или битовые ошибки, возникающие при передаче [2]. Метод так же позволяет вырабатывать рекомендации относительно числа циклов TDM-потока, которые инкапсулируются в кадр Ethernet, обеспечивающего эффективное использование полосы пропускания канала связи.