

О СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОМ МЕТОДЕ ИЗМЕРЕНИЙ

С. Н. ГУЗЕВИЧ

*Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт МО РФ,
199106, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: guzevich@yandex.ru*

Представлен анализ стереоскопического метода измерений. Обоснована причина систематической погрешности измерений параметров электромагнитных полей при использовании одного измерителя. Выведены геометрическая и временная зависимости при реализации стереоскопического метода для определения положения и размеров объектов. Полученные зависимости совпадают по характеру построения и использованию принципа общей относительности, связывающего размеры образов и объект.

Ключевые слова: *стереоскопический метод, отображение, измерение, парная проективная система координат.*

Модель зрительных измерений, рассмотренная в работе [1], основана на методе центрального проецирования образов объектов с использованием парной проективной системы координат. Эта система реализуется с помощью двух измерителей, разнесенных по базе, где геометрические и электромагнитные модели описания оптических измерений совпадают.

Существующие модели зрительных и оптических измерений базируются на „основных законах оптических явлений“ [2], отображают процесс передачи информации приближенно и не совпадают с ее реальным распространением.

Основой описания полученной информации с помощью зрительного процесса являются образы объектов. Измерения расстояний между объектами с помощью двух оптических измерителей хорошо известны и носят название стереоскопических. Необходимость повышения точности оптических и электромагнитных измерений выявила трудности при использовании как геометрической, так и электромагнитной модели для измерений расстояний.

Стереоскопический метод обеспечивает наиболее точные измерения расстояний между объектами. Свойства электромагнитных полей не зависят от используемого технического средства измерений, однако в настоящее время результаты измерений разными техническими средствами описываются разными зависимостями [2, 3].

В геометрической оптике при использовании стереоскопического метода объект рассматривается как точечный, а наблюдатель имеет измерительную базу в виде двух точек, соединенных прямой. Тогда расстояние от базы наблюдателя до объекта оценивается как

$$L = \frac{d}{2} \cdot \operatorname{ctg}(\alpha / 2), \quad (1)$$

где d — измерительная база наблюдателя, α — параллактический угол.

При измерении параметров электромагнитных полей стереоскопический метод рассматривают как дополнительный к „временному“ методу. При этом применяются два измерителя, разнесенные в пространстве. Для повышения точности измерений используется дополнительная оценка временного сдвига двух принимаемых сигналов (фазового или частотного), одновременно измеренных в двух точках на известном расстоянии.

В электротехнике основным параметром является скорость распространения информации (света), измерения основаны на использовании времени и являются относительными, хотя скорость распространения информации в общем случае зависит от изменения параметров

окружающей среды, а в качестве дополнительного фактора используется сравнение фаз двух сигналов.

Таким образом, имеются два подхода к использованию стереоскопического метода измерений.

Рассмотрим на примере работы локатора влияние характера пространственного распространения сигнала на точность измерения расстояний при допущении о постоянстве скорости его распространения [4]. На рис. 1 показана модель излучения локатора C при некотором постоянном угле $\Delta\beta$ раскрытия антенны. Локатор освещает приближающийся к нему объект размером a , который находится в зоне излучения. Отображение объекта a на различных расстояниях R_i от локатора формируется на плоскости $\Gamma\Omega$ экрана в ортогональной системе координат $\Gamma Y\Omega$. При локационных измерениях информационным параметром является амплитуда A_i принимаемого сигнала, график изменения которой в процессе движения объекта вдоль оси Y также показан на рис. 1. Точка перегиба графика является границей разделения зон локации.

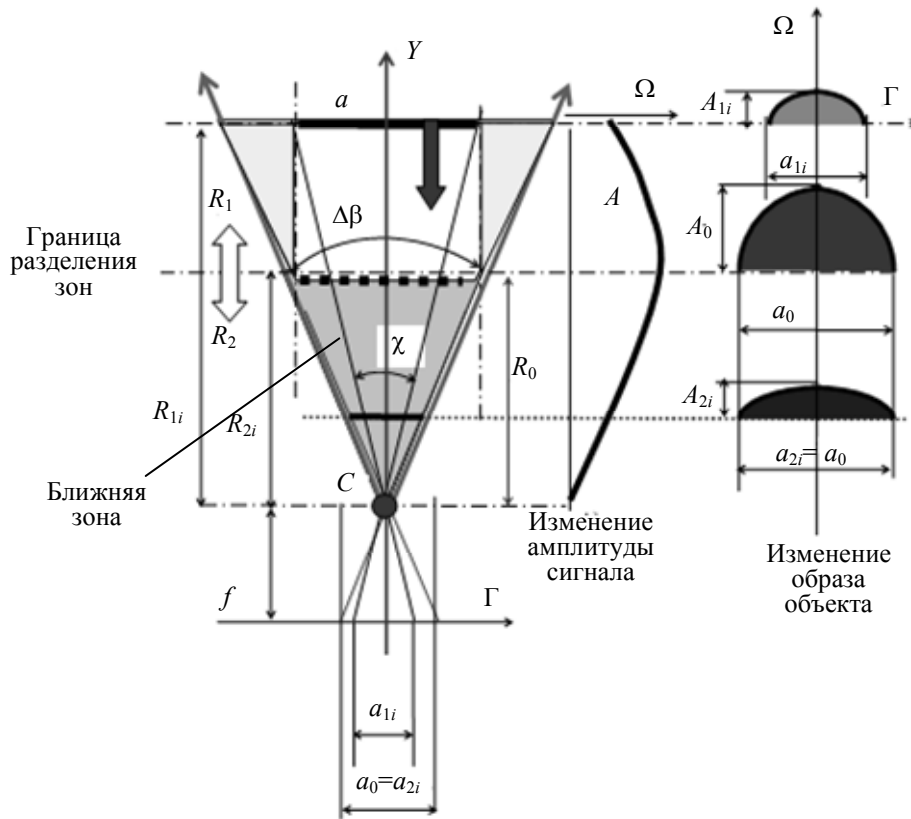


Рис. 1

Рассмотрим локационный процесс измерений в каждой из зон. В геометрическом приближении локационный процесс описывается с помощью лучей, исходящих из локатора в секторе угла $\Delta\beta$ раскрытия антенны и угла χ обзора объекта [4, 5]. При приближении объекта его проекция a_{1i} увеличивается пропорционально углу „засветки“ объекта, т. е. линейно от R_{1i} . При этом величина R_{1i} определяется по изменяющемуся углу χ :

$$a_{1i} = a \frac{f}{R_{1i}} = f \operatorname{tg} \chi; \quad R_{1i} = a \operatorname{ctg} \chi, \quad (2)$$

где f — расстояние от экрана до центра измерителя.

При этом справедливо соотношение

$$\frac{\operatorname{ctg} \chi}{\operatorname{ctg} \Delta\beta} = \frac{R_{1i}}{R_0},$$

где R_0 — расстояние, при котором раскрыв антенны сопоставим с размером объекта a .

При постоянной скорости распространения сигнала (V) время наблюдения определяется частотой сканирования луча по кругу [4], тогда можно записать:

$$R_0 = Vt_0, \quad R_{1i} = R_0 \frac{t_{1i}}{t_0} = Vt_{1i}, \quad (3)$$

где t_{1i} — интервал времени, принятый за эквивалент угла χ .

Из выражения (2) следует тождественное равенство

$$\frac{\operatorname{ctg} \chi}{\operatorname{ctg} \Delta\beta} = \frac{R_{1i}}{R_0} = \frac{Vt_{1i}}{Vt_0} = \frac{t_{1i}}{t_0}.$$

Пространство, для которого справедливо равенство (1), назовем дальней зоной локации. При приближении объекта размер отображения a_{1i} увеличивается в соответствии с выражением (1), что обеспечивает пропорциональное изменение амплитуды A_{1i} сигнала:

$$A_{1i} \equiv k_{\Phi} a_{1i}^2 = k_{\Phi} (f \operatorname{tg} \chi)^2, \quad (4)$$

где k_{Φ} — коэффициент формы объекта; при этом потенциал принимаемого сигнала U_{1i} определяется как

$$U_{1i} = A_{1i} a_{1i} = k_{\Phi} a_{1i}^3 = k_{\Phi} (f \operatorname{tg} \chi)^3. \quad (5)$$

Сигнал, поступающий на локатор C , зависит от углов χ и $\Delta\beta$ и расстояния R_i .

Преобразуем сферическую систему координат в декартову, в которой время определяется циклом углового сканирования:

$$t_i = \frac{2\pi - \chi}{\omega} = \frac{1}{F} \left(1 - \frac{\chi}{2\pi} \right),$$

где F и ω — частота и угловая частота сканирования.

Тогда угол χ может быть интерпретирован как оценка времени углового сканирования по поверхности объекта, а угол $\Delta\beta$ — как интервал времени облучения объекта. При приближении объекта угол χ изменяется от 0 до π со скоростью, зависящей от частоты сканирования, но после обеспечения равенства $\chi = \Delta\beta$ значение сигнала, отраженного от объекта, становится постоянным. Эту область измерений назовем „ближней зоной объекта“ (см. рис. 1). Размер отображения a_{2i} в ближней зоне остается постоянным, так как размер зоны определяется только углом раскрытия антенны:

$$a_{2i} = R_{2i} \operatorname{tg} \Delta\beta = \frac{R_{2i}}{R_0} a_0. \quad (6)$$

Следовательно, размер отображения объекта a_{2i} не зависит от угла χ и времени; амплитуда A_{2i} отраженного сигнала также не зависит от времени, т.е.

$$U_{2i} = A_{2i} a_{2i} = k_{\Phi} a_{1i}^3 = k_{\Phi} (R_{2i} f \operatorname{tg} \Delta\beta)^3. \quad (7)$$

Как видно из выражений (6), (7), ни один из параметров, характеризующих отображение объекта, не зависит от угла χ обзора объекта и от времени.

При использовании одного приемника расстояние, равное $R_0 = a \operatorname{ctg} \Delta\beta$, является систематической погрешностью измерений, случайно изменяющейся и во времени, и в пространстве, так как размер наблюдаемого объекта изменяется в зависимости от взаимной ориентации объекта и локатора.

Все результаты измерений параметров электромагнитных полей с использованием одного приемника содержат систематическую погрешность, которая может достигать величин, до сотни раз превышающих размеры наблюдаемого объекта (для телескопов при $\Delta\beta = 1'$ $\operatorname{ctg} \Delta\beta \approx 10^{-4}$, тогда расстояние до космических объектов оценивается с погрешностью, превышающей размеры этих объектов в 10^4 раз).

Результаты анализа погрешностей могут быть применимы к любым измерительным устройствам. Различие заключается лишь в том, что при измерении сигналов антенн, размеры которых зависят от частоты, углы наблюдений и раскрытия антенн известны и постоянны.

Наличие систематической погрешности при использовании технических средств измерений является основанием для утверждения, что отображение информации техническими средствами и зрительными средствами осуществляется по близким, но не совпадающим измерительным схемам.

Определим условия, при которых геометрическое приближение достоверно и точно отображает рассматриваемые процессы.

В стереоскопической системе координат (СК) формируются два плоскостных изображения объекта [2]. Для использования стереоскопической СК достаточно направить ось Y на наблюдаемый объект (рис. 2, а). Проведем через измерители — антенны 1 и 2 — две вспомогательные оси Y_1 и Y_2 . Из точек 1 и 2 через границы углов χ_{1i} и χ_{2i} обзора объекта проведем лучи, которые „смотрят“ на объект, что может быть реализовано, когда углы γ_1 и γ_2 раскрытия антенн больше углов обзора объекта. Углы γ_1 и γ_2 определяют границы обзора антенн локатора. В результате формируются три системы координат XOY , $X_1O_1Y_1$ и $X_2O_2Y_2$, при этом СК $X_1O_1Y_1$ и $X_2O_2Y_2$ связаны с реальными измерителями, а СК XOY не имеет конкретного измерителя и является фиктивной. Для реальных антенн сохраняются все свойства одиночных, в том числе и наличие ближней зоны, а значит, и систематической погрешности измерений.

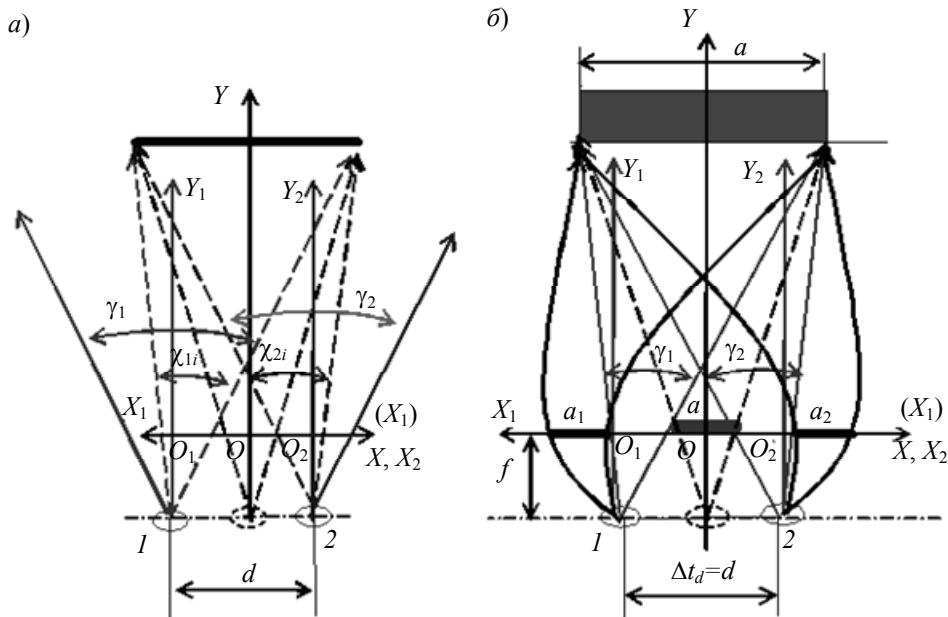


Рис. 2

Следовательно, суммирование реальных изображений объектов обеспечивает получение их пространственного отображения, но при этом исключает точное измерение расстояний между объектами по их отображениям.

Стереоскопическая система координат обладает двойными свойствами, которые действуют в пространстве между измерителем и источником поля, модельно разделяя процессы измерения и наблюдения. При этом возникает вопрос, какую базу необходимо использовать для определения положения и размеров объекта при геометрическом описании. Для ответа на этот вопрос рассмотрим схему, представленную на рис. 3. Анализ данной модели приведен в работе [1], где получены выражения

$$\frac{\Gamma_2}{L+f} = \frac{d}{L}; \quad L = \frac{fd}{\Gamma_2 - d} = \frac{f}{\Gamma_2/d - 1}; \quad D = D_2 \frac{L}{f} = \frac{D_2}{\Gamma_2/d - 1}. \quad (8)$$

Здесь $(\Gamma_2/d - 1)$ — относительное изменение размера базы по оси Γ .

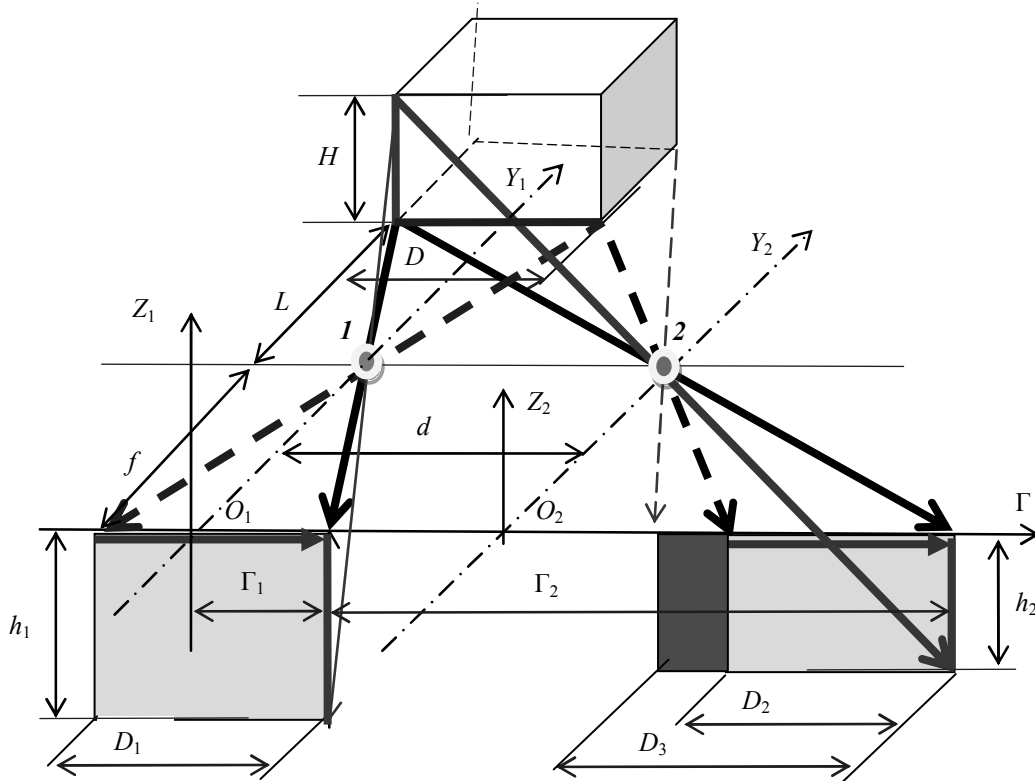


Рис. 3

Таким образом, в стереоскопической системе координат при геометрическом описании результаты измерений основываются не на размере базы, а на относительном изменении проекции размера базы на ось Γ через точки проецируемых сторон. Формула (1), используемая для описания расстояний стереоскопическим методом, содержит систематическую погрешность измерений, тогда как выражение (8) основано на разности размеров трансформации базы, что исключает систематическую погрешность измерений. Это показывает, что стереоскопическая система координат разделяет процессы пространственного отображения объекта и определения его положения.

Рассмотрим влияние скорости распространения сигнала на результаты измерений при отображении объекта в фиктивной системе координат (см. рис. 2, б). При этом для конкретности примем, что $d < a$. Для СК $X_1O_1Y_1$ и $X_2O_2Y_2$ скорости распространения сигнала могут быть произвольными, но равными между собой (что справедливо, так как измерительная база d значительно меньше расстояния до объекта). В этих СК изменения скорости могут быть описаны гиперболическими функциями. Приведение этих функциональных зависимостей к системе координат XOY дает постоянную величину, равную $d/2$. Это характеризует постоянство скорости и влияния окружающей среды на отрезке d как во времени, так и в пространстве. При построении этих функциональных зависимостей на расстоянии f формируются два реальных образа объекта a_1 , a_2 и один фиктивный a в СК XOY .

Стереоскопическая система координат, в которой „осмотр“ пространства выполняется сканирующим лучом, называется парной проективной системой координат [1, 6—9]. Для каждого наблюдаемого отображения в такой системе можно составить одно линейное уравнение, содержащее два неизвестных — расстояние до объекта и его размер. Наличие системы из двух линейных уравнений обеспечивает возможность определения размеров объекта и его положения, при этом база измерений d используется как опорная величина.

Рассмотрим использование параметра времени для определения размеров и положения объекта (рис. 4). Описание процесса измерений в парной проективной системе координат приведено в работе [1], где получены следующие выражения:

$$t_2 = \frac{Z}{V_{23}}; \quad t_3 = \frac{Z+d}{V_{23}}; \quad V_{23} = \frac{d}{|t_3 - t_2|} = \frac{d}{\Delta t_{3-2}}; \quad (9)$$

$$Z = \frac{d_Z t_2}{\Delta t_{3-2}} = \frac{d_Z}{(t_3/t_2) - 1}; \quad X = \frac{d_X t_4}{\Delta t_{3-4}} = \frac{d_X}{(t_3/t_4) - 1},$$

здесь V_{23} — оценка скорости распространения сигнала в направлении локатора; t_2, t_3, t_4 — интервалы времени от момента излучения сигнала до его приема антеннами 2, 3, 4 (см. рис. 4); $\Delta t_{3-2}, \Delta t_{3-4}$ — интервалы времени между характерными точками на измерительных осях.

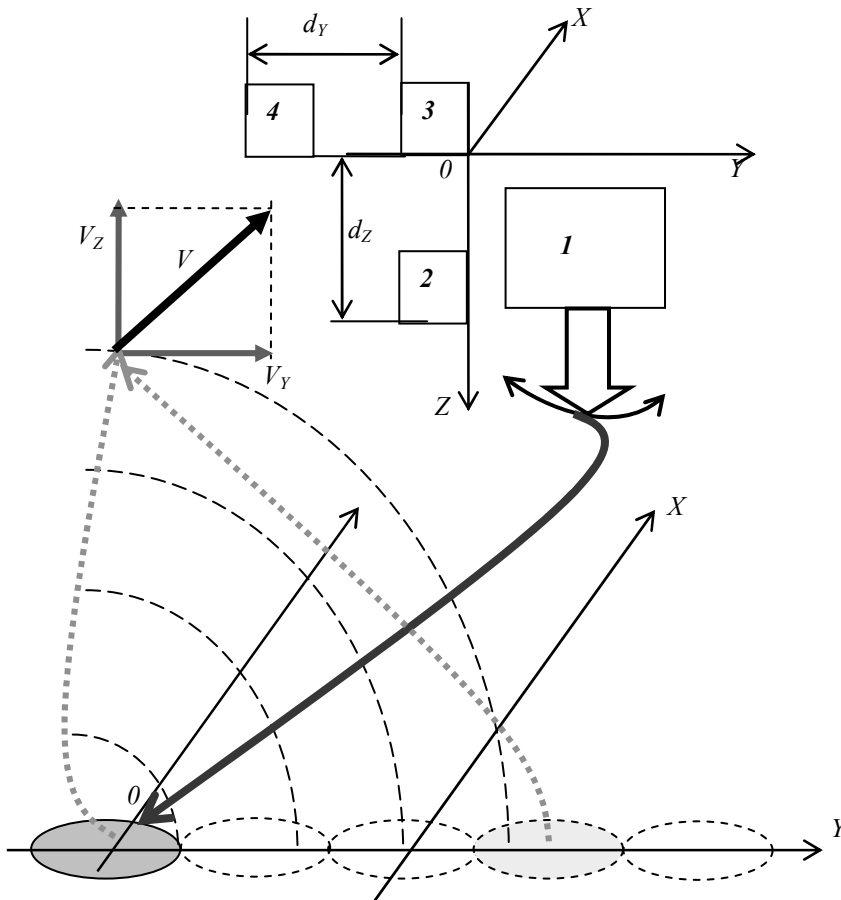


Рис. 4

При обеспечении требуемой дискретности измерений координаты точки отражения сигнала определяются с заданной относительной погрешностью.

Выражения (9) основаны на использовании принципа общей относительности сравнимых временных отрезков, что свидетельствует об их аналогичности выражению (8).

Таким образом, стереоскопическая система координат является отражением природного процесса зрительных измерений, соединение в которой линейного и сканирующего процессов распространения сигнала обеспечивает создание парной проективной системы координат, где зрительные, оптические и электромагнитные модельные зависимости совпадают.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гузевич С. Н. Модель зрительных измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 1. С. 66—71.
2. Родионов С. А. Основы оптики. Конспект лекций. СПб: СПб ГИТМО, 2000. 167 с.

3. Лобанов А. Н. Фотограмметрия. М.: Недра, 1984. 552 с.
4. Козлов А. И. Радиолокация. Физические основы и проблемы // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 6.
5. Елизаветин И. В., Шувалов Р. И., Буш В. А. Принципы и методы радиолокационной съемки для целей формирования цифровой модели местности // Геодезия и картография. 2009. № 1. С. 39—45.
6. Четверухин Н. Ф. Проективная геометрия. М.: УЧПЕДГИЗ, 1953. 350 с.
7. Гузевич С. Н. О стереоскопической модели измерений расстояний в радиотехнических системах // Радиотехника. Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. № 1. С. 4—9.
8. Гузевич С. Н. О достоверности радиолокационных измерений // Авиакосмическое приборостроение. 2013. № 7. С. 34—43.
9. Гузевич С. Н. Об одной систематической погрешности локационных измерений // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 10. С. 42—50.

Сведения об авторе

Святослав Николаевич Гузевич — канд. техн. наук; ГНИНГИ МО РФ; E-mail: guzevich@yandex.ru

Рекомендована Институтом

Поступила в редакцию
13.01.15 г.

Ссылка для цитирования: Гузевич С. Н. О стереоскопическом методе измерений // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 543—549.

ON STEREOSCOPIC MEASUREMENT METHOD

S. N. Guzevich

*State Scientific-Research Institute of Navigation & Hydrographic, 199106, Saint Petersburg, Russia
E-mail: guzevich@yandex.ru*

The stereoscopic measurement method using optical and electromagnetic meters are analyzed. An explanation for systematic errors in electromagnetic field measurements using a single meter is provided. Geometric and temporal dependencies of object position and size determined with the use of the stereoscopic method are derived. The dependences are shown to coincide with relations between the images and the object size obtained from the general relativity principle.

Keywords: stereoscopic method, display, measurement, conjugate projection coordinate system.

Data on author

Svyatoslav N. Guzevich — PhD; State Scientific-Research Institute of Navigation & Hydrographic; E-mail: guzevich@yandex.ru

Reference for citation: Guzevich S. N. On stereoscopic measurement method // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 7. P. 543—549 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-7-543-549